

MANCAIS MAGNÉTICOS COM FITAS SUPERCONDUTORAS 2G

André Ramos de Castro

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica da Escola
Politécnica da Universidade Federal do Rio
de Janeiro como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Engenheiro.

Orientador: Felipe Sass

Coorientador: Rubens de Andrade Junior

Rio de Janeiro
Agosto de 2013

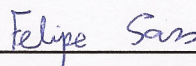
MANCAIS MAGNÉTICOS COM FITAS SUPERCONDUTORAS

2G

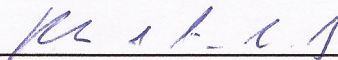
André Ramos de Castro

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO
DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO
ELETRICISTA.

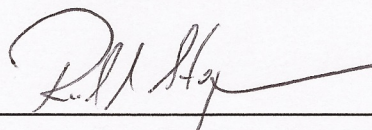
Examinado por:



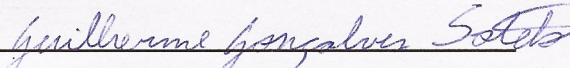
Prof. Felipe Sass, M.Sc.



Prof. Rubens de Andrade Junior, D.Sc.



Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.



Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2013

Castro, André Ramos de

Mancais Magnéticos de Fitas Supercondutoras 2G/André Ramos de Castro. - Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

XII, 76 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Felipe Sass, Rubens de Andrade Junior

Projeto de Graduação - UFRJ/ POLI/ Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 64-66.

1. Mancais magnéticos supercondutores. 2. Fitas 2G. 3. Força de levitação. 4. Corrente persistente. 5. Distribuição de campo magnético. I. Sass, Felipe, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Elétrica. III. Mancais Magnéticos com Fitas Supercondutoras 2G.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos vão ao CNPq, pelo apoio financeiro; ao meu orientador, Felipe Sass, pelas discussões, sugestões e conselhos na confecção deste trabalho; ao meu coorientador e professor, Rubens de Andrade Jr., pelas aulas ao longo do meu curso de graduação, orientações extra-classe, discussões e pela oportunidade de realizar este trabalho; aos demais companheiros do LASUP, pelo auxílio nos experimentos; a Carla Bonifazi, João Torres e Edivaldo Santos pelas oportunidades na Física, orientações e apoio ao longo do meu curso de graduação; à minha família, que sempre me apoiou e me encorajou em todo meu trajeto; aos amigos de colégio, faculdade, intercâmbio e gingico; e à minha namorada e amiga, Mariana Caire, pela paciência, pelo apoio, companhia, incentivo e pelo seu amor neste primeiro ano de namoro.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Mancais Magnéticos com Fitas Supercondutoras 2G

André Ramos de Castro

Agosto/2013

Orientador: Felipe Sass

Coorientador: Rubens de Andrade Junior

Curso: Engenharia Elétrica

O presente trabalho é um estudo sobre o desempenho de um mancal magnético supercondutor. O mancal emprega uma bobina supercondutora de fitas de segunda geração confeccionada em laboratório, sem o uso de solda. Dessa forma, não há resistência na bobina, permitindo a formação de correntes persistentes. Foram realizados ensaios de aproximação da bobina com o trilho que será usado no trem de levitação magnética com supercondutores MagLev Cobra sendo desenvolvido no LASUP, COPPE/UFRJ. Foram medidas as forças sobre a bobina para diferentes posições sobre o trilho e condições de resfriamento. Induziu-se uma corrente persistente na bobina, que foi medida através do mapeamento do campo magnético por ela gerado e da comparação dessa medida com simulações. O novo mancal apresentou melhor força de levitação que o mancal de fitas de segunda geração previamente estudado no LASUP. Com as medidas de campo magnético, foi possível estimar a corrente persistente na bobina e seu decaimento. A comparação com simulações empregando o método dos elementos finitos permitiu estimar essa corrente.

Palavras-chave: mancal magnético, maglev, supercondutor, fita 2G.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrical Engineer.

Magnetic Bearing using 2G Superconductor Wire

André Ramos de Castro

August/2013

Advisor: Felipe Sass

Co-advisor: Rubens de Andrade Junior

Course: Electrical Engineering

This work is a study on the performance of a superconducting magnetic bearing. This bearing employs a superconductive coil made in the laboratory out of second-generation wire, without any soldering. This way, there is no resistance in the coil, allowing for persistent currents to form. An experiment was carried out to illustrate how the coil responds to movement around the magnetic track to be used on the superconductive magnetic levitation train MagLev Cobra, being developed at LASUP, COPPE/UFRJ. Measurements of the force on the coil were taken for different positioning of the coil and different cooling processes. Also, a current induced on the coil was measured through the mapping of the magnetic field it created and comparing it with simulations. The new bearing showed higher levitation forces than the bearing made of second-generation wire previously studied at LASUP. The magnetic field measurements allowed one to observe the coil's persistent current and its decay. Comparing these measurements to finite elements simulations lead to the estimation of this current.

Keywords: magnetic bearing, maglev, superconductor, 2G wire.

Sumário

1. Introdução	1
2. Supercondutores	3
2.1. Histórico.....	3
2.2. Conceitos	4
2.2.1. Resistividade nula	5
2.2.2. Efeito <i>Meissner</i>	6
2.2.3. Tipos de supercondutores.....	7
2.3. Fitas supercondutoras 2G.....	8
2.4. Mancais magnéticos supercondutores.....	8
2.4.1. Blocos maciços	9
2.4.2. Fitas empilhadas	10
2.4.3. Laço 2G.....	11
3. Construção do protótipo.....	13
3.1. Equipamentos e recursos	13
3.1.1. Fitas supercondutoras 2G	13
3.1.2. Resina	14
3.1.3. Cilindro de G10	14
3.2. Metodologia	14
3.2.1. Projeto	15
3.2.2. Corte da fita.....	15
3.2.3. Laço de corrente	16
3.2.4. Estrutura.....	16
3.2.5. Resinagem	18
4. Ensaaios de força	19
4.1. Equipamentos e recursos	19
4.1.1. Sistema de movimentação	20
4.1.2. Trilho	20
4.1.3. Ímã cilíndrico	21
4.1.4. Célula de carga	22
4.1.5. <i>Software</i> de controle da bancada.....	22
4.1.6. <i>Software</i> de simulação <i>Maxwell</i>	23
4.2. Metodologia	24
4.2.1. <i>Zero Field Cooling</i> (ZFC).....	24
4.2.2. <i>Field Cooling</i> (FC)	26

4.2.3.	Ensaio com movimentação lateral.....	27
4.2.4.	Simulação da força medida.....	27
4.3.	Resultados e análise.....	28
4.3.1.	Ensaio de ZFC.....	29
4.3.2.	Ensaio de FC.....	35
4.3.3.	Ensaio com movimentação lateral.....	39
4.3.4.	Simulações.....	43
5.	Ensaio de mapeamento de campo.....	45
5.1.	Equipamentos e recursos	45
5.1.1.	Sistema de movimentação.....	46
5.1.2.	Sensor de efeito <i>Hall</i>	46
5.1.3.	Amplificador e sistema de aquisição.....	47
5.1.4.	<i>Software</i> de controle da bancada.....	47
5.2.	Metodologia	48
5.2.1.	Indução da corrente persistente.....	48
5.2.2.	Mapeamento de campo.....	49
5.2.3.	Simulação do campo medido.....	50
5.3.	Resultados e análise.....	55
5.3.1.	Ensaio.....	55
5.3.2.	Simulações.....	57
6.	Conclusões e trabalhos futuros.....	62
7.	Referências bibliográficas.....	64
8.	Anexo.....	67
8.1.	Sensor de efeito <i>Hall</i>	67
8.2.	Fita 2G.....	71
8.3.	Amplificador Operacional <i>INA122</i>	75

Sumário de figuras

Figura 1 - Ilustração qualitativa dos limites da região de supercondutividade.....	5
Figura 2 - Ilustração do comportamento de um material de resistividade nula para $T < T_c$ e um supercondutor de temperatura crítica T_c em resposta a um campo magnético externo. Figura adaptada de (SASS, 2011).	6
Figura 3 - Vórtices dispostos em uma rede de <i>Abrikosov</i> em um supercondutor de tipo II. Figura adaptada de (SASS, 2011).	7
Figura 4 - Bloco supercondutor de YBCO utilizado no MagLev Cobra. Adaptado de (SASS, ANDRADE JR., <i>et al.</i> , 2012b).	10
Figura 5 - Fitas empilhadas utilizadas em comparação com <i>bulk</i> . Adaptado de (SASS, ANDRADE JR., <i>et al.</i> , 2012b).	11
Figura 6 - Primeiro teste de abertura de rasgo em um segmento de fita 2G e disposição como laço 2G.	11
Figura 7 - Carretéis das fitas 2G da SuperPower utilizadas.	13
Figura 8 - Os dois componentes da resina <i>EP29LPSPAO</i> da <i>Master Bond</i>	14
Figura 9 - Ilustração do segmento de fita em tamanho real com rasgo central.	15
Figura 10 - Ilustração do posicionamento de uma fita no laço 2G.	17
Figura 11 - Fita supercondutora cortada e com rasgo, estrutura com as 100 fitas e caneta de referência. Grade de 1 cm x 1 cm de fundo.	17
Figura 12 - Laço 2G em seu aspecto final, após resinado, sobre uma grade de 1 cm x 1 cm. Os eixos usados para mapeamento e simulação estão desenhados sobre a figura.	18
Figura 13 - Fotografia com trilho magnético e todo o aparato experimental para o ensaio de força. Nota-se a estrutura de movimentação vertical (1), a célula de carga (2), o laço 2G (3) e o trilho (4).	19
Figura 14 - Linhas de campo produzidas pelo trilho.	20
Figura 15 - Trilho magnético usado para ensaios de força e laço 2G. Em cinza, ferro e, em branco, ímãs Nd-Fe-B. Todas as distâncias estão em milímetros.	21
Figura 16 - Caixa de alumínio que contém o ímã cilíndrico utilizado em ensaios de força e mapeamento de campo.	22
Figura 17 - Malhas utilizadas na segunda (em cima) e na décima quinta (embaixo) iteração da solução do trilho magnético 2D.	23
Figura 18 - Montagem para ensaio de força com ímã cilíndrico. Temos a Estrutura para movimentação vertical (1), a célula de carga (2), o ímã cilíndrico (3), o laço 2G (4) e o recipiente de nitrogênio líquido (5).	26

Figura 19 - Modelo tridimensional de trilho e laço 2G usado nas simulações de força.	28
Figura 20 - Sistemas de coordenadas e posicionamentos do laço 2G utilizados nos ensaios.	29
Figura 21 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de ZFC 100 mm → 5 mm → 100 mm em CS1 (a), CS2 (b) e CS3 (c).	30
Figura 22 - Gráfico das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaio de ZFC 100 mm → 5 mm → 100 mm em CS1. Eixo maior do laço 2G perpendicular ao eixo y do trilho.	33
Figura 23 - Gráfico das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaio de ZFC 100 mm → 5 mm → 100 mm em CS2. Eixo maior do laço 2G perpendicular ao eixo y do trilho.	34
Figura 24 - Ensaio de ZFC realizado com ímã cilíndrico. Detalhe adaptado de (SASS, ANDRADE JR., <i>et al.</i> , 2012a) mostra resultado do mesmo ensaio para fitas empilhadas (apenas a força de levitação foi medida).	35
Figura 25 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de FC em CS1, com resfriamento a 10 (a), 20 (b) e 30 mm (c) de altura.	36
Figura 26 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de FC em CS2, com resfriamento a 20 (a) e 30 mm (b) de altura.	37
Figura 27 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de FC com ímã cilíndrico e resfriamento a 10 (a), 20 (b) e 30 mm (c) de distância. Detalhe adaptado de (SASS, ANDRADE JR., <i>et al.</i> , 2012a) mostra resultado do mesmo ensaio para fitas empilhadas (apenas a força de levitação foi medida).	38
Figura 28 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de FC lateral com resfriamento em 5 (a), 10 (b), 20 (c), 30 mm (d) e de ZFC lateral (e) na posição CS1 paralela.	40
Figura 29 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de FC lateral com resfriamento em 5 (a), 10 (b), 20 (c), 30 mm (d) e de ZFC lateral (e) na posição CS1 perpendicular.	41
Figura 30 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de FC lateral com resfriamento em 5 (a), 10 (b), 20 (c), 30 mm (d) e de ZFC lateral (e) na posição CS1 perpendicular.	42
Figura 31 - Mesa de mapeamento de campo magnético. Em destaque a ponteira com o sensor (1), os eixos de movimentação (2) e os circuitos de alimentação e acionamento dos motores (3).	45

Figura 32 - Ilustração do princípio de funcionamento de um sensor de efeito Hall. Com o sensor imerso em um campo magnético B , uma corrente externa I (fluxo de elétrons $-e$ no sentido contrário) é fornecida. A tensão V é o sinal de saída.	46
Figura 33 - Circuito do amplificador de sinal do sensor, o CI INA122.	47
Figura 34 - Aparato montado para indução da corrente persistente. Temos a estrutura de movimentação vertical (1), o ímã cilíndrico (2), o laço 2G submerso (3), o recipiente para o nitrogênio líquido (4).	49
Figura 35 - Mapeamento do campo magnético sobre o laço 2G.....	50
Figura 36 - Modelo tridimensional do laço 2G em bloco.....	51
Figura 37 - Modelo tridimensional de fita individual.	52
Figura 38 - Comparação entre fita equivalente do modelo de laço 2G em fita (em cima) e em bloco (embaixo).	53
Figura 39 - Comparação entre modelo de laço 2G emulado através da replicação da fita individual (em cima) e laço 2G em bloco (embaixo).	53
Figura 40 - Mapeamento em $t_1 = 15$ minutos da componente vertical do campo magnético produzido 3 mm acima do laço 2G pela corrente persistente nele induzida.	56
Figura 41 - Campo simulado produzido pela fita de uma das extremidades da bobina, centrada em $x \cong -5$ mm.	57
Figura 42 - Campo resultante da superposição dos 100 campos deslocados da fita individual.	58
Figura 43 - Interpolação do campo resultante das 100 fitas e sub-região central indicada.	58
Figura 44 - Campo gerado pelo laço 2G modelado em bloco e sub-região central indicada.	59

Sumário de tabelas

Tabela 1 - Dados da célula de carga <i>Delta SI-660-60</i>	22
Tabela 2 - Forças medidas em cada eixo e a magnitude total para o ponto mais próximo no ensaio de ZFC paralelo em CS1.	43
Tabela 3 - Forças e corrente resultantes do ajuste da corrente do laço 2G em simulação, de forma a igualar F_z a valor medido.	43
Tabela 4 - Erro relativo $(F_{sim} - F_{exp})/F_{exp}$ calculado para cada componente.	43
Tabela 5 - Valores de correlação cruzada entre distribuições de campo.	59
Tabela 6 - Correntes persistentes calculadas, para cada método, usando a simulação de laço 2G de fitas.	60
Tabela 7 - Correntes persistentes calculadas, para cada método, usando a simulação de laço 2G em bloco.	60

1. Introdução

O físico holandês Heike Kamerlingh ONNES (1911), durante um experimento criogênico, deparou-se com um estranho fenômeno. A temperaturas menores que 4,2 K, o mercúrio apresentou resistividade efetivamente nula. Posteriormente, descobriu-se que, nessas condições, ocorre também o efeito *Meissner*, a expulsão completa do campo magnético do interior do material. A este estado da matéria, deu-se o nome de supercondutividade.

Desde então, e principalmente após a descoberta dos supercondutores de altas temperaturas críticas (*High Temperature Superconductors* - HTS) em 1986, buscam-se aplicações para essas interessantes propriedades. Algumas delas são limitadores de corrente (BALDAN, LAMAS, *et al.*, 2009), máquinas elétricas supercondutoras (PEI, *et al.*, 2009), cabos de transmissão de energia elétrica (SELVAMANICKAM, 2009), eletromagnetos de alto campo (HAZELTON, SELVAMANICKAM, 2009) e veículos de levitação magnética (NICOLSKY, *et al.*, 2000, OGATA, MIYAZAKI, *et al.*, 2010).

O Laboratório de Aplicações de Supercondutores da EP/COPPE/UFRJ (LASUP) atua na consolidação de conhecimento, investigação sobre aplicações em sistemas elétricos e caracterização de supercondutores de alta temperatura crítica. Um importante projeto em desenvolvimento no LASUP é a construção de um protótipo em tamanho real de um trem baseado em levitação magnética com supercondutores, chamado MagLev Cobra (SOTELO, G. G., ANDRADE JR., R., *et al.*, 2013, STEPHAN, ANDRADE JR., *et al.*, 2012). Neste projeto, tem-se um trilho composto por ímãs permanentes sobre o qual um trem, apoiado sobre blocos supercondutores contidos em criostatos com nitrogênio líquido, desliza a uma altura de alguns milímetros, sem contato mecânico, suportado por forças magnéticas. Este projeto encontra-se atualmente na construção de sua primeira linha de testes em escala real, que liga dois prédios do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

O protótipo do MagLev Cobra utiliza mancais com supercondutores maciços. Estes supercondutores, entretanto, possuem um processo de fabricação limitado, com problemas de homogeneidade, o que dificulta a produção em larga escala. Por este motivo, o LASUP está estudando sua substituição por fitas supercondutoras de segunda geração (2G). Nesse contexto, e diante de uma diferente possibilidade de configuração de bobina supercondutora (LEVIN, BARNES, *et al.*, 2008) feita com

fitas 2G, vislumbrou-se a construção de um novo tipo de mancal supercondutor. Este trabalho, portanto, se propõe a construir um protótipo desse mancal e realizar ensaios de desempenho.

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

No capítulo presente, é feita uma introdução com motivação e objetivos do trabalho. O capítulo 2 fornece uma base histórica e teórica sobre supercondutividade, o principal assunto abordado no trabalho. Em seguida, no capítulo 3, a metodologia, o processo e os resultados acerca da construção do protótipo de laço 2G são descritos. O capítulo 4 expõe toda a parte do trabalho referente a ensaios de força realizados com o mancal de laço 2G. Essa parte do trabalho envolve também simulações com o *software Maxwell* para solução de problemas através do método dos elementos finitos (MEF). No capítulo 5, tentou-se desenvolver e aplicar um método de aferição da corrente circulante no laço através do mapeamento do campo magnético gerado por essa corrente e comparação com um modelo computacional. O capítulo 6 contempla conclusões e potenciais desenvolvimentos futuros. Finalmente, toda a referência bibliográfica utilizada neste trabalho é listada no capítulo 7.

2. Supercondutores

Este capítulo apresenta um breve histórico do fenômeno da supercondutividade, seus conceitos básicos e uma comparação entre os tipos de materiais magnéticos supercondutores em estudo no LASUP.

2.1. Histórico

O fenômeno da supercondutividade foi descoberto por Heike Kamerlingh ONNES (1911). Após conseguir liquefazer o hélio, em 1908, Onnes começou a estudar o comportamento da resistência de metais com a diminuição de temperatura aproveitando o seu recém desenvolvido método para obter temperaturas de até 1 K. Ao experimentar com o mercúrio, Onnes observou a abrupta queda de resistividade para temperaturas menores que 4,2 K, valor denominado temperatura crítica (T_c) do supercondutor. Portanto, um comportamento de condutor perfeito.

Descobriu-se também que, além da temperatura crítica do supercondutor, há também uma densidade de corrente crítica (J_c) e uma intensidade de campo magnético crítica (H_c , descoberta por Onnes em 1914), acima dos quais a resistividade do material volta a tomar valores não nulos. Além disso, descobriram-se outros materiais que apresentam essas propriedades, mas com diferentes valores críticos, como o chumbo. De fato, cerca de metade dos metais torna-se supercondutora a baixas temperaturas, além de algumas ligas metálicas e compostos cerâmicos.

MEISSNER e OCHSENFELD (1933) descobriram outra característica do estado supercondutor, que o diferencia de apenas um condutor perfeito. Essa característica recebeu o nome de efeito *Meissner* e consiste na expulsão do campo magnético do interior do material, fazendo dos supercondutores diamagnetos perfeitos. Alguns materiais supercondutores, ditos de tipo II, apresentam ainda um estado misto, onde há a expulsão parcial do campo magnético, além do estado de expulsão total.

Dentre as teorias que tentaram explicar a supercondutividade, podemos citar a de LONDON e LONDON (1935), de origem fenomenológica. Essa modelagem mostrava como, na presença de um campo magnético externo, um supercondutor desenvolve correntes superficiais que anulam o campo magnético em seu interior. Outra teoria, também fenomenológica, foi desenvolvida por GINZBURG e LANDAU

(1950) e tentava explicar a termodinâmica da transição entre os estados normal e supercondutor.

O primeiro passo para a primeira descrição da supercondutividade a partir de leis fundamentais da Física, entretanto, veio de COOPER (1956). Nesse modelo, há uma associação dos elétrons que transportam a corrente em pares, conhecidos posteriormente como pares de Cooper. O resultado dessa ideia foi o modelo criado por BARDEEN, COOPER e SCHRIEFFER (1957), conhecido como BCS. Essa teoria tornou-se a principal referência em modelo microscópico para a supercondutividade, explicando com sucesso o comportamento dos supercondutores até a descoberta dos HTS, em 1986.

Uma terceira teoria fenomenológica que deve ser citada é a de BEAN (1962). Ela ficou conhecida como modelo de estado crítico e estabelece como a distribuição de corrente no interior de supercondutores do tipo II depende do campo magnético aplicado.

Em 1986, iniciou-se uma revolução no meio, causada pela descoberta da supercondutividade em compostos cerâmicos, mais especificamente os baseados em La-Ba-Cu-O, com temperaturas críticas entre 30 e 35 K. Até então, o material supercondutor de maior temperatura crítica era o Nb_3Ge , com $T_c \approx 24$ K. Em 1987, descobriu-se que compostos de Y-Ba-Cu-O (YBCO) apresentavam temperaturas críticas entre 80 e 100 K. Outros compostos descobertos em seguida apresentam temperaturas críticas ainda maiores, sendo que o composto $Hg_1-Ba_2-Ca_2-Cu_3-O_8$ detém o atual recorde de T_c , igual a 133 K. Esses compostos, chamados de HTS, deram um grande incentivo à pesquisa de supercondutores e possíveis aplicações à medida que permitiram que o nitrogênio líquido, cuja temperatura de liquefação é $\cong 77$ K, fosse utilizado para manter o supercondutor abaixo de sua temperatura crítica. Antes disso, essa função era desempenhada pelo hélio líquido, que tem um custo de produção muito maior. O modelo BCS não prevê a ocorrência dos HTS e não há, até hoje, uma teoria que os explique a partir de leis fundamentais da Física satisfatoriamente (ROSE-INNES, RHODERICK, 1969).

2.2. Conceitos

A seguir, serão apresentados os principais conceitos sobre o que caracteriza os supercondutores.

2.2.1. Resistividade nula

A resistividade nula foi o primeiro efeito observado dos supercondutores. Dado que a resistividade elétrica é compreendida como a dificuldade de deslocamento dos elétrons devida a impurezas na estrutura cristalina do metal e à vibração de seus átomos, Onnes esperava que, ao reduzir a temperatura do mercúrio (escolhido pela alta pureza que conseguia-se obter à época) a sua resistividade reduziria suavemente. Entretanto, abaixo 4,2 K, a resistividade abruptamente tornou-se imensurável. É importante notar que não foi apenas o baixo valor de resistividade que caracterizou a supercondutividade, mas a queda repentina observada.

Deve-se observar que os valores críticos de temperatura, intensidade de campo magnético e densidade de corrente (H_c , T_c , J_c) são interdependentes, havendo uma região no espaço tridimensional de pontos (H , T , J), ilustrada qualitativamente na Figura 1, para a qual o material se encontra no estado supercondutor.

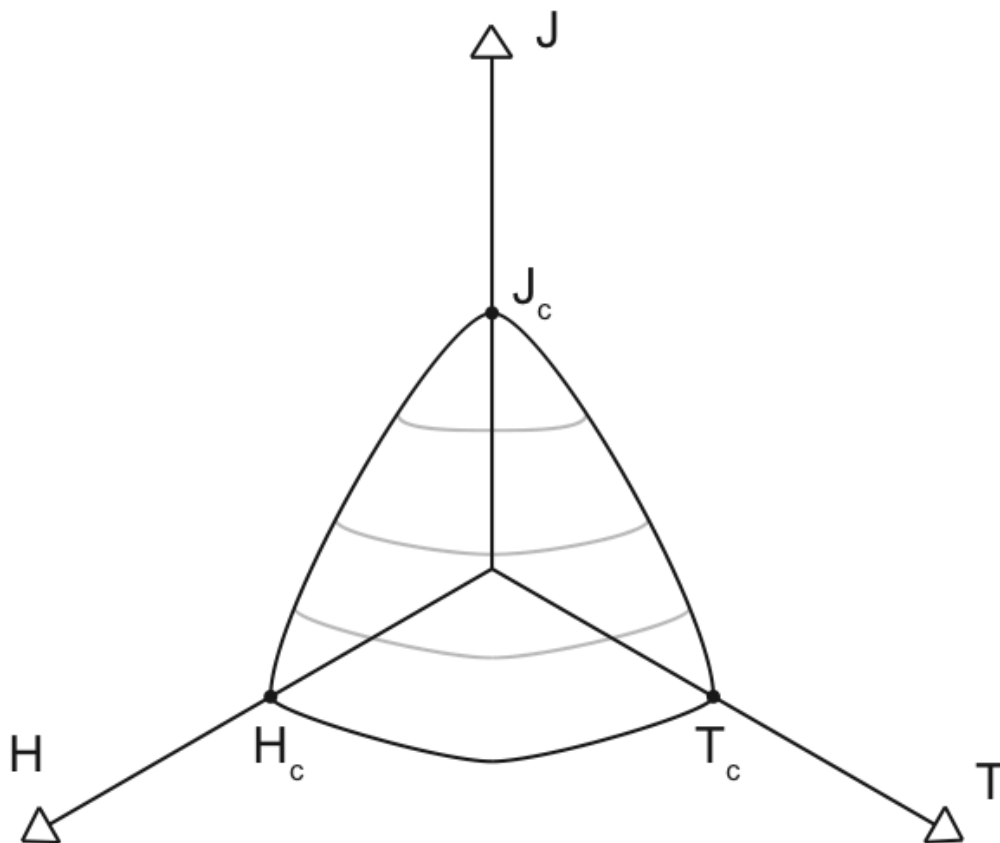


Figura 1 - Ilustração qualitativa dos limites da região de supercondutividade.

2.2.2. Efeito *Meissner*

O efeito *Meissner* é a segunda grande propriedade dos supercondutores. Esse efeito diferencia os supercondutores de condutores perfeitos, caracterizando-os também como diamagnetos perfeitos, pois expulsam o campo magnético de seu interior.

Caso a supercondutividade fosse apenas resistividade nula, um condutor imerso em um campo magnético, ao ter sua temperatura reduzida para além da crítica, não sofreria alterações no campo magnético. Nessa mesma configuração, se o campo externo fosse removido, correntes surgiriam como consequência da variação de campo magnético, mantendo um campo magnético em seu interior no mesmo sentido que o original. Entretanto, não é isso que acontece com os supercondutores. Na situação descrita, ao transitar para uma temperatura abaixo da crítica, correntes superficiais surgem gerando um campo magnético contrário ao externo e blindando seu interior. Ao remover-se o campo externo, essa corrente cessaria, mantendo um campo nulo em seu interior. A Figura 2 ilustra esses cenários com um condutor perfeito (a, b e c) e um supercondutor (d, e e f).

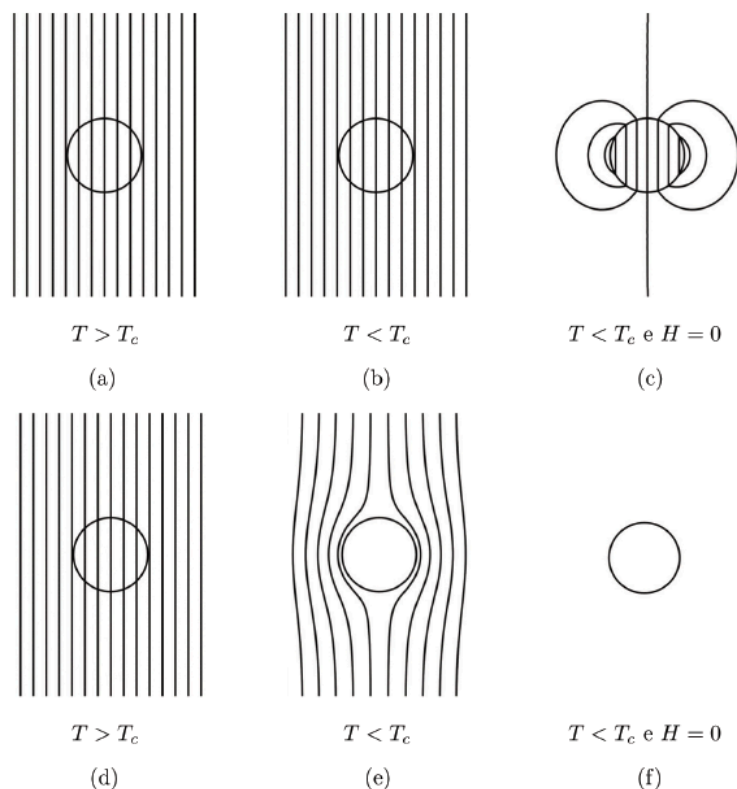


Figura 2 - Ilustração do comportamento de um material de resistividade nula para $T < T_c$ e um supercondutor de temperatura crítica T_c em resposta a um campo magnético externo. Figura adaptada de (SASS, 2011).

2.2.3. Tipos de supercondutores

Uma classificação possível e muito utilizada dos supercondutores é quanto à forma como o fluxo magnético pode penetrar no material. A primeira, chamada apenas de tipo I, possui somente o estado supercondutor com expulsão total do campo magnético (efeito Meissner) e o estado normal. Os supercondutores deste tipo se comportam como diamagnetos perfeitos e condutores perfeitos em determinada região no espaço (H, T, J) e como materiais normais fora dessa região. Supercondutores do tipo I são tipicamente elementos da tabela periódica e ligas metálicas.

A segunda classificação é o tipo II, que possui, além dos estados normal e supercondutor, um estado misto. Nesse estado, que ocorre para $H_{c1} < H < H_{c2}$, há penetração parcial de fluxo magnético no material. Para $H < H_{c1}$, o material se encontra no estado supercondutor com efeito *Meissner* e, para $H > H_{c2}$, no estado normal. Esses limites podem ser estendidos para o espaço (H, T, J) discutido anteriormente, resultando em regiões de efeito *Meissner*, de estado misto e de estado normal.

A penetração de fluxo magnético em supercondutores de tipo II ocorre em regiões tubulares de estado normal. Esses tubos são dispostos sobre o supercondutor em uma estrutura geométrica chamada rede de ABRIKOSOV (1957), mostrada na Figura 3. Eles também são chamados de vórtices ou fluxóides e o fluxo em cada um deles é discreto e de valor:

$$\varphi_0 = \frac{h}{2e} = 2,068 \times 10^{-15} \text{ Wb} \quad (1)$$

onde h é a Constante de Planck e e , a Carga Elementar.

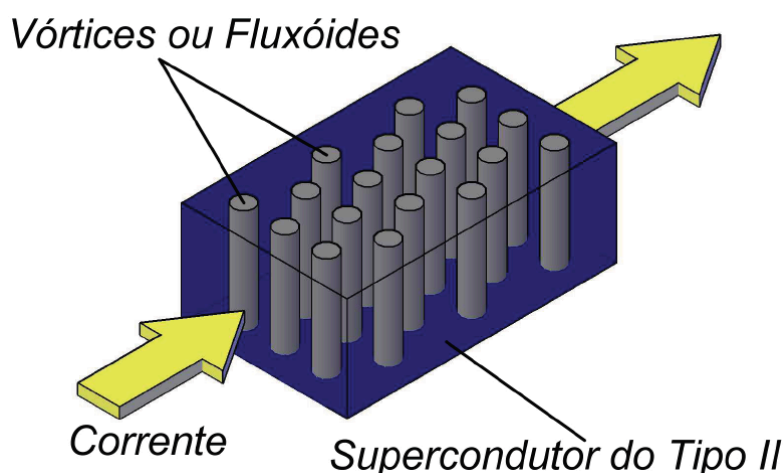


Figura 3 - Vórtices dispostos em uma rede de *Abrikosov* em um supercondutor de tipo II. Figura adaptada de (SASS, 2011).

2.3. Fitas supercondutoras 2G

As fitas supercondutoras 2G foram o principal material utilizado neste trabalho. As fitas representam uma alternativa de tecnologia mais recente aos supercondutores em blocos maciços (*bulk*), já bem conhecidos e estudados no ramo, mas com problemas sérios de qualidade e escala de produção. O encapsulamento de supercondutores em fita é mais vantajoso que o *bulk* no sentido que permite a produção em escala industrial e com alta homogeneidade de suas propriedades em trechos produzidos da ordem de quilômetros.

A primeira geração de fitas foi produzida entre 2000 e 2005 e utilizava o supercondutor Bi-2223. A segunda geração de fitas utiliza supercondutores YBCO, sendo economicamente mais atraentes que a primeira geração. A principal diferença entre a fita 2G e a fita 1G é a maior intensidade de campo crítica encontrada nas fitas 2G. Além disso, as fitas 1G possuíam uma matriz de prata correspondente a 70% de seu volume, resultando em um grande custo de produção. As fitas 2G, por outro lado, não utilizam prata e seu alto custo é decorrente do fato de serem ainda uma tecnologia nova.

Essas fitas são compostas por uma complexa estrutura de camadas, de forma a conferir estabilidade térmica, química, mecânica e elétrica à fita. De fato, a camada de material supercondutor representa por vezes cerca de 1% do volume da fita 2G. O Anexo 8.2 mostra em maiores detalhes a estrutura de camadas de fitas 2G do fabricante *SuperPower*, que forneceu as fitas utilizadas neste trabalho.

As fitas 2G ainda possuem um preço muito alto, cerca de US\$90/m. A tendência atual, entretanto, é a queda desse preço, ao passo que a corrente crítica das fitas aumenta. A evolução do processo de produção das fitas está acelerado. O comprimento de fita homogênea que fabricantes conseguiam produzir saltou da ordem de centenas de metros, em 2007, para a ordem de quilômetros em 2009. Quanto à densidade de corrente crítica, enquanto nos *bulks* YBCO alcançam-se valores de até $8 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ a 4 K e 10^9 A/m^2 a 77 K, ambos a 0 T, com fitas YBCO já superaram-se os valores de $1,37 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ a 4 K e 2×10^{10} a 77 K, também a 0 T (SASS, 2011).

2.4. Mancais magnéticos supercondutores

Um mancal é um elemento que confere suporte entre duas estruturas em movimento entre si, como o rotor de um motor (mancal rotativo) ou um trem sobre

trilhos (mancal linear). Os mancais de natureza eletromagnética apresentam pontos positivos, em relação aos que se baseiam em contato mecânico, como menos perdas por atrito, resultando em maior eficiência, e a diminuição de vibração mecânica e ruído.

A grande vantagem de mancais magnéticos supercondutores sobre outros mancais eletromagnéticos é a sua estabilidade natural. Enquanto outros sistemas dependem da implementação de um controle robusto com sensoramento, devido às suas instabilidades inerentes, o sistema supercondutor é passivamente estável. A maior desvantagem de um mancal baseado em supercondutores, por outro lado, é a necessidade de um sistema de refrigeração.

A base de um mancal magnético supercondutor é a interação com ímãs permanentes. Quando há variação no campo magnético, correntes são induzidas no supercondutor, gerando um campo magnético oposto a essa variação. Como não há resistência, essa corrente se mantém, assim como o campo magnético que ela gera. A interação entre esses dois campos dá origem a uma força de repulsão no supercondutor.

Essa força apenas, entretanto, não é suficiente para conferir estabilidade a esse sistema. Supercondutores do tipo II permitem a penetração parcial de campo em seu interior com a formação de vórtices. Nesse caso, o deslocamento do supercondutor em um gradiente de campo magnético levaria a um deslocamento dos vórtices, o que acarreta em uma força restauradora (força de aprisionamento) sobre o supercondutor. Para que ocorra a penetração de campo no supercondutor, este deve ser resfriado na presença do campo magnético, processo chamado de *Field Cooling* (FC), ou pode ser realizado bombeamento de campo. Neste processo, o supercondutor, que foi resfriado fora da presença de campo (*Zero Field Cooling* - ZFC), é levado a um campo magnético e lá mantido, contra forças restaurativas, até que a penetração de campo ocorre e o supercondutor encontra uma posição de equilíbrio estável.

Nas seções seguintes, veremos diferentes arranjos do material supercondutor estudadas para aplicação em mancais magnéticos.

2.4.1. Blocos maciços

Os supercondutores usados nos mancais do trem MagLev Cobra, que está sendo desenvolvido no LASUP, são deste tipo (Figura 4), também chamado de *bulk*. Ainda não conseguiu-se desenvolver um processo de fabricação de supercondutores maciços com um bom padrão de qualidade (alta homogeneidade

na produção) e de larga escala. Entretanto, o custo mais baixo e o fato de ser uma tecnologia mais consolidada levou à escolha destes supercondutores para compor os mancais do MagLev Cobra. Diante das limitações em sua produção, alternativas com fitas supercondutoras estão sendo estudadas.

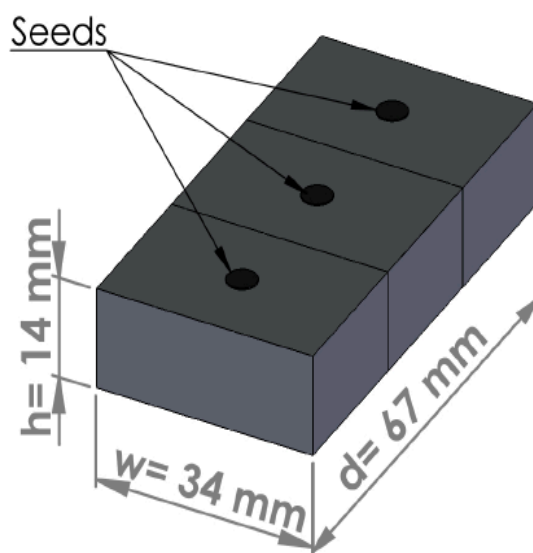


Figura 4 - Bloco supercondutor de YBCO utilizado no MagLev Cobra. Adaptado de (SASS, ANDRADE JR., *et al.*, 2012b).

2.4.2. Fitas empilhadas

Estudos foram realizados no LASUP (SASS, ANDRADE JR., *et al.*, 2012a, 2012b) com fitas 2G em comparação com blocos maciços. Nesses trabalhos, segmentos de fitas 2G foram empilhadas e dispostas lado a lado de forma a aproximar o volume e a forma de um bloco (Figura 5). Resultados mostraram que a força de levitação do bloco foi consistentemente maior que a das fitas empilhadas, além de seu custo ser menor. O bloco utilizado no estudo foi comprado em 2011 por cerca de 300 euros. O bloco construído com fitas 2G, por outro lado, apesar de possuir um volume de YBCO 98% menor que o bloco maciço, custou aproximadamente 90 dólares por metro de fita utilizada, totalizando, com 36 m, aproximadamente US\$3240. Deve ser notado, entretanto, que os preços das fitas 2G estão caindo e as correntes críticas estão aumentando, melhorando a viabilidade econômica dessa forma de aplicação de supercondutores. Além disso, há ainda muito trabalho a ser feito para otimizar a forma de empregar as fitas para este tipo de aplicação.

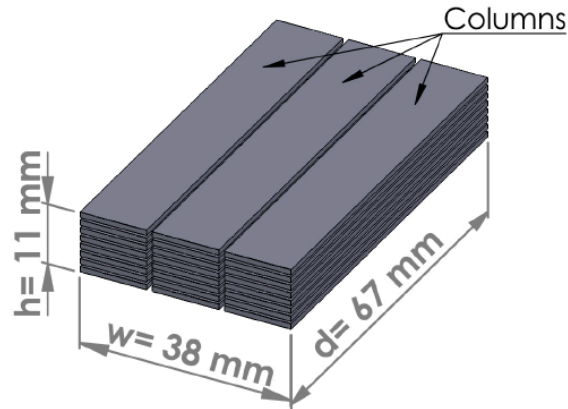


Figura 5 - Fitas empilhadas utilizadas em comparação com *bulk*. Adaptado de (SASS, ANDRADE JR., *et al.*, 2012b).

2.4.3. Laço 2G

Este trabalho explorará uma forma de utilizar fitas 2G como uma bobina sem o uso de solda, que introduziria uma resistência no circuito. Como mostrado em (LEVIN, BARNES, *et al.*, 2008), um segmento de fita 2G pode ter um rasgo feito sobre sua face, formando uma bobina, como na Figura 6. Diversos segmentos de fitas podem ser dispostos desta maneira, posicionados lado a lado e aumentando a capacidade de corrente da bobina, limitada pela densidade de corrente crítica do supercondutor. Neste trabalho, esse tipo de bobina será chamado de laço 2G.

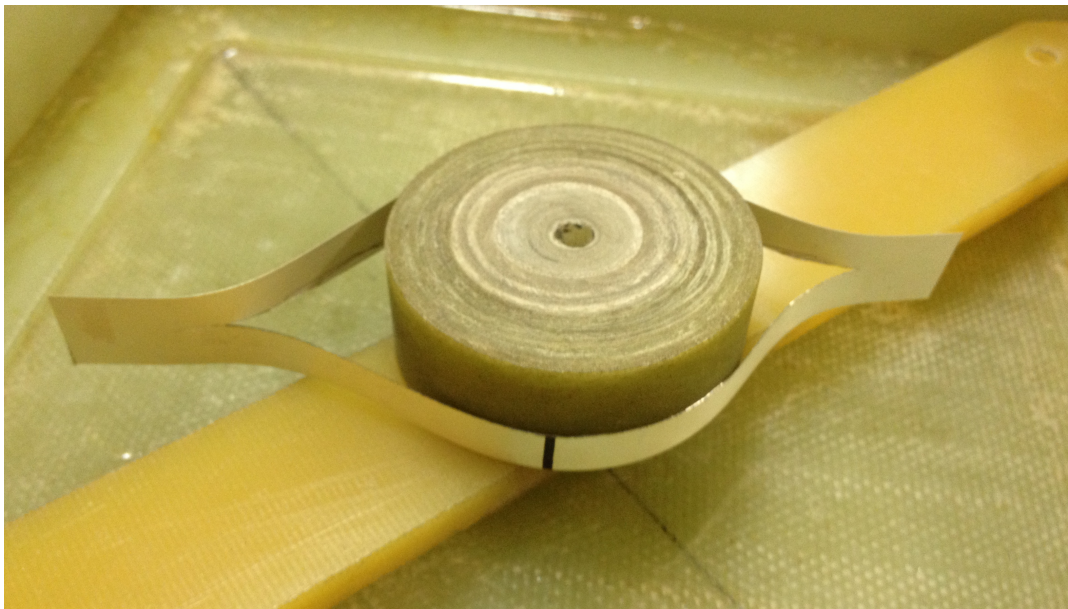


Figura 6 - Primeiro teste de abertura de rasgo em um segmento de fita 2G e disposição como laço 2G.

O laço 2G permite o melhor aproveitamento de uma consequência da ausência de resistividade em circuitos supercondutores, as correntes persistentes. Uma corrente I circulando por uma resistência R dissipa energia a uma taxa $P = I^2 R$. Logo, uma corrente induzida em um circuito fechado com alguma resistência rapidamente dissipa sua energia e se extingue. Em um circuito fechado sem resistências, como um formado apenas por supercondutores, entretanto, não há dissipação de energia, que fica armazenada no campo magnético produzido pela corrente. Essa corrente se mantém indefinidamente e é portanto chamada de corrente persistente.

3. Construção do protótipo

Este capítulo apresenta os materiais utilizados e a metodologia empregada na confecção do protótipo de laço 2G. Ao final do capítulo, os resultados e o aspecto final do laço 2G serão expostos. Este será o laço 2G utilizado nos ensaios experimentais.

3.1. Equipamentos e recursos

A seguir, serão detalhados os equipamentos e recursos utilizados na confecção do laço 2G. Basicamente, as fitas supercondutoras de segunda geração da *SuperPower* e uma resina da *Master Bond* para proteger o protótipo e assegurar sua durabilidade.

3.1.1. Fitas supercondutoras 2G

As fitas supercondutoras utilizadas foram fitas supercondutoras de 2ª geração (2G) da *SuperPower*, da linha SF12050-AP, caracterizada pelas suas dimensões, 12 mm de largura e 50 μm de espessura. O sufixo "AP" vem de *Advanced Pinning* (aprisionamento avançado) e indica a alta performance em aplicações imersas em campos magnéticos.

Foram utilizadas fitas de dois carretéis diferentes, o 20110516, com 49 μm de espessura e corrente crítica mínima de 276 A, e o 20120228-2, com 52 μm de espessura e corrente crítica mínima de 317 A, ambos mostrados na Figura 7. Mais detalhes sobre as fitas 2G da *SuperPower* podem ser encontradas no Anexo 8.2.



Figura 7 - Carretéis das fitas 2G da SuperPower utilizadas.

3.1.2. Resina

A resina *EP29LPSPAO* da fabricante *Master Bond* foi utilizada para proteger o laço 2G de esforços mecânicos e da exposição à umidade. Segundo o fabricante, ela é projetada para aplicações criogênicas (até 4 K) como adesivo, selante, revestimento e encapsulante e suporta choques criogênicos (da temperatura ambiente até a do hélio líquido entre 5 e 10 minutos). Composta por duas pastas que são misturadas para a aplicação, suas propriedades incluem boa condutividade térmica, bom isolamento elétrico e uma boa aderência a uma grande variedade de materiais, como metais, vidro, materiais cerâmicos e plásticos.



Figura 8 - Os dois componentes da resina *EP29LPSPAO* da *Master Bond*.

3.1.3. Cilindro de G10

O G10 é um material de fibra de vidro e resina epóxi comumente utilizado no laboratório em montagens de experimentos com nitrogênio líquido pela resistência que apresenta a esforços mecânicos a baixas temperaturas. Escolheu-se este material para o núcleo que sustenta o laço 2G. Uma peça cilíndrica de cerca de 39 mm de diâmetro e 14 mm de altura foi encomendada à oficina do laboratório.

3.2. Metodologia

Este tópico explica cada etapa envolvida na construção do protótipo de laço 2G.

3.2.1. Projeto

Este trabalho se propõe a avaliar o desempenho de uma nova configuração de mancal magnético utilizando fitas supercondutoras 2G. Essa avaliação será feita a partir da construção de um protótipo sobre o qual se realizarão ensaios em laboratório.

A ideia básica desse novo arranjo de fitas 2G é a abertura de um rasgo sobre a face das fitas, criando um potencial laço de corrente sem o uso de solda para fechar o circuito. Assim, preserva-se a ausência de resistência no laço.

Por tratar-se de um primeiro protótipo, suas dimensões foram escolhidas de forma a tornar sua confecção mais prática a partir dos materiais já disponíveis no laboratório. Usou-se a peça cilíndrica de G10 como uma estrutura para apoio do laço e que o manteria aberto. Assim, arbitrou-se um rasgo de 100 mm em segmentos de fita de 120 mm, como na Figura 9.

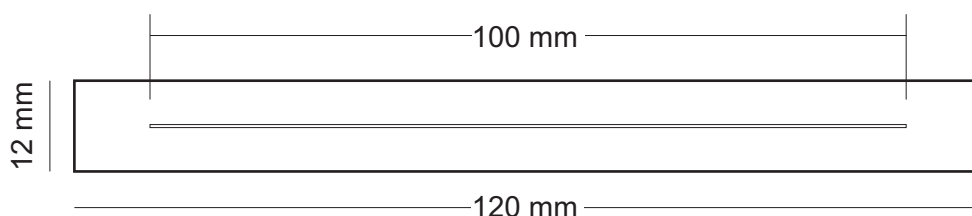


Figura 9 - Ilustração do segmento de fita em tamanho real com rasgo central.

Colocando o aparato da Figura 6 sobre uma balança e resfriando-o com nitrogênio líquido, aproximou-se um ímã de Nd-Fe-B para um teste inicial. Observou-se uma variação em torno de 20 g na leitura da balança com a aproximação do ímã, o que equivale a uma força de cerca de 0,2 N. A partir deste teste rudimentar, estipulou-se que a bobina construída seria composta por 100 segmentos de fita empilhados.

3.2.2. Corte da fita

As etapas em 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4 envolviam trabalho manual exaustivo e foram feitas com auxílio do orientador Felipe Sass. Esta primeira etapa consiste em desenrolar a fita do carretel fornecido pelo fabricante, posicioná-la sobre a mesa de uma guilhotina, medindo o comprimento de 120 mm a ser cortado, e abaixar o facão, fazendo o corte. O movimento de corte deve ser ágil e firme, ou a lâmina pode dobrar a fita, danificando-a, em vez de cortá-la.

Dessa forma, temos um segmento da fita a ser usado no laço 2G. Esse procedimento foi repetido 100 vezes para obter todas as fitas necessárias de acordo com o projeto estipulado.

3.2.3. Laço de corrente

Devido às camadas que revestem o material supercondutor da fita, abrir o rasgo para a formação do laço de corrente não é simples. Além disso, imperfeições na linha de corte fazem de um trecho do laço mais estreito que o outro, levando a densidades de corrente mais altas nos trechos mais estreitos e à redução da corrente crítica do laço. Dessa forma, fez-se necessário o desenvolvimento de um método para fazer o corte na fita. Este método deve permitir o corte de fitas de maneira rápida e mantendo-o limpo e preciso.

Para esse primeiro protótipo, utilizamos placas G10 finas, de 0,5 mm de espessura, sobre o qual fez-se um rasgo de 100 mm de comprimento com múltiplas passadas de um estilete. Imprimiu-se um desenho da fita de 120 mm com o rasgo de 100 mm, que foi colado com fita adesiva sobre um dos lados da placa com os rasgos (do G10 e do papel impresso) alinhados. A fita supercondutora foi então fixada, também com fita adesiva, sobre a outra face da placa, utilizando o papel como referência pra o posicionamento (a placa G10 é semitransparente). Finalmente, a placa foi apoiada, com a fita supercondutora no lado de baixo, sobre uma superfície e múltiplas passadas de estilete foram realizadas sobre o rasgo de G10, sobre a fita, até que o rasgo na fita se abrisse por completo.

Esse método é ainda muito rudimentar, mas serviu ao propósito de construção de um protótipo. Há algumas imperfeições na linha de corte, decorrentes da movimentação da fita durante o corte, posicionamento incorreto em relação à placa e das múltiplas passadas de estilete, com variadas forças e velocidades, decorrentes do trabalho manual. Futuramente, é possível estudar o uso de um aparelho de corte a laser para a execução dessa etapa.

3.2.4. Estrutura

Para a disposição das fitas em uma estrutura de bobina, de forma que ocorresse uma variação de fluxo magnético satisfatória, foi usada uma peça cilíndrica de G10. Essa peça foi usinada em oficina, com a remoção de dois pedaços para o encaixe, caso fosse desejado, de um sensor de corrente. Além disso, um furo cilíndrico foi feito em seu centro para a fixação com um parafuso durante os ensaios.

Após cortados os segmentos de fitas supercondutoras e os rasgos em cada uma delas, as fitas eram posicionadas uma a uma sobre a peça central. Pode-se notar que metade de cada fita passa por um nível superior, enquanto a outra metade faz a volta por um nível inferior. As fitas são posicionadas de forma que a fita cuja parte superior é a mais interna tem a parte inferior mais externa, como mostra a Figura 10. Alternativamente, a fita cuja parte inferior é a mais interna possui a parte superior mais externa. Esses detalhes podem ser observados na Figura 11.

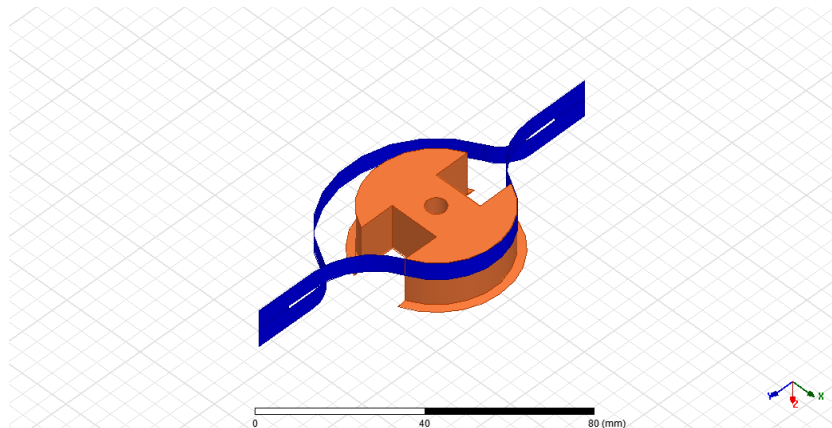


Figura 10 - Ilustração do posicionamento de uma fita no laço 2G.

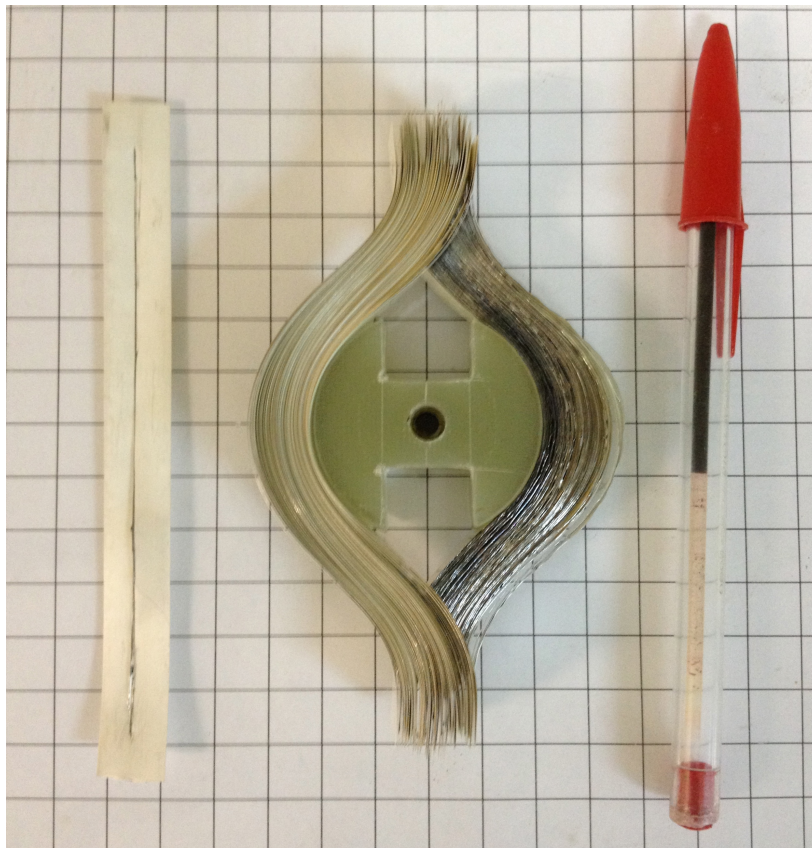


Figura 11 - Fita supercondutora cortada e com rasgo, estrutura com as 100 fitas e caneta de referência. Grade de 1 cm x 1 cm de fundo.

3.2.5. Resinagem

A fita supercondutora pode ter suas propriedades degradadas ou perdidas caso sofra exposição indevida a certas faixas de temperatura, esforços mecânicos ou umidade elevada por longos períodos de tempo. Além disso, ao fazer-se o rasgo na fita necessário para esse tipo de montagem, a fita perde parte de sua proteção contra a umidade e deteriora-se mais rapidamente. Portanto, o uso de uma resina é fundamental no sentido de proteger o laço 2G de esforços mecânicos (como forças de *Lorentz*) e dos efeitos da umidade.

O primeiro passo do processo de resinagem consiste na mistura das duas partes (A e B) mostradas na Figura 8 na proporção A/B de 100/65. Em seguida, uma fina camada da mistura é aplicada sobre a peça, que depois é levada ao forno à temperatura de aproximadamente 60°C. O tempo para curar é ao menos 4 horas.

A Figura 12 mostra o laço 2G construído em seu aspecto final. Ele é composto por 100 segmentos de 120 mm de fitas supercondutoras 2G da *SuperPower* de 12 mm de largura. As fitas foram encaixadas sobre um núcleo de G10 e o conjunto foi resinado.

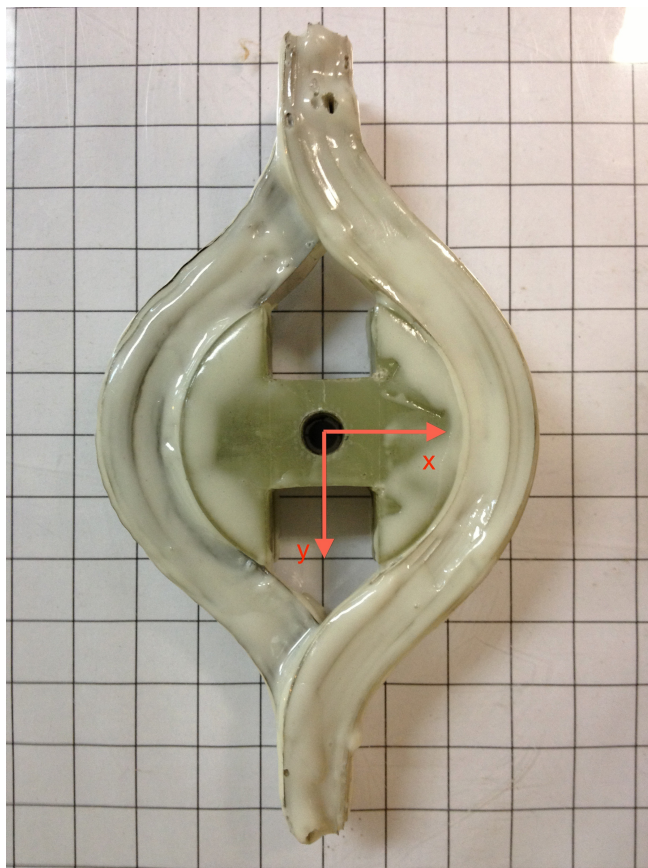


Figura 12 - Laço 2G em seu aspecto final, após resinado, sobre uma grade de 1 cm x 1 cm. Os eixos usados para mapeamento e simulação estão desenhados sobre a figura.

4. Ensaaios de força

Neste capítulo, será exposta toda a parte do trabalho referente aos ensaios de medição de forças sobre o laço 2G quando imerso em um campo magnético. Ele é dividido em uma seção de equipamentos e recursos, uma seção de metodologia e uma última de exposição de resultados e análise dos mesmos.

4.1. Equipamentos e recursos

Os ensaios de força realizados neste trabalho foram feitos sobre uma bancada que permite a movimentação relativa em dois eixos e ao qual acoplamos medidores de força, ímãs e o laço 2G. Cada parte deste aparato experimental será detalhada nas subseções a seguir. A Figura 13 mostra uma foto do trilho na mesa de ensaio de força, a estrutura de movimentação vertical, a célula de carga, apresentada na seção 4.1.4, e a estrutura usada para fixar o laço 2G e o recipiente com nitrogênio líquido.

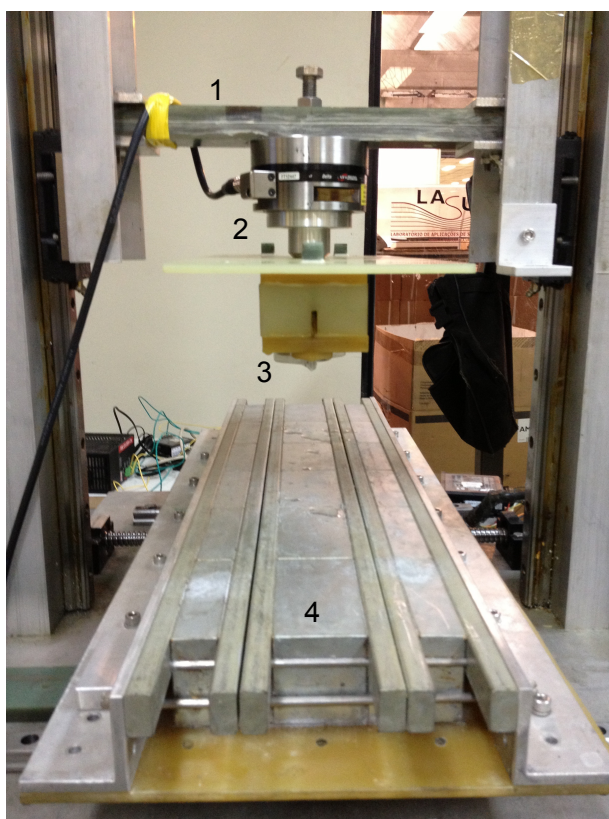


Figura 13 - Fotografia com trilho magnético e todo o aparato experimental para o ensaio de força. Nota-se a estrutura de movimentação vertical (1), a célula de carga (2), o laço 2G (3) e o trilho (4).

4.1.1. Sistema de movimentação

O sistema de movimentação é composto por um circuito de alimentação, dois motores de passo, seus *drivers*, um *hub* para comunicação com a porta serial do computador e os suportes mecânicos que são movimentados. Os motores giram fusos que movimentam os suportes quando comandados por um programa de computador. Para todos ensaios deste trabalho, foi utilizada uma velocidade constante de movimentação de 5 mm/s.

Se tomarmos a Figura 13 como referência, um dos motores movimenta o trilho na horizontal, de um lado para o outro. O segundo motor está acoplado à estrutura ao qual estão presos a célula de carga, o laço 2G e o recipiente e movimenta todos esses componentes na direção vertical.

4.1.2. Trilho

Em grande parte dos ensaios de força realizados, foi usado um trilho com um campo magnético permanente gerado por um arranjo de ímãs. Esse trilho é o mesmo, em escala real, daquele que será usado na construção da linha CT-I/CT-II do trem magnético MagLev Cobra. Ele foi fruto de uma busca extensiva entre trilhos de diversas geometrias e arranjos de ímãs (MOTTA, 2011). A distribuição de campo produzida pelo trilho pode ser vista na Figura 14.

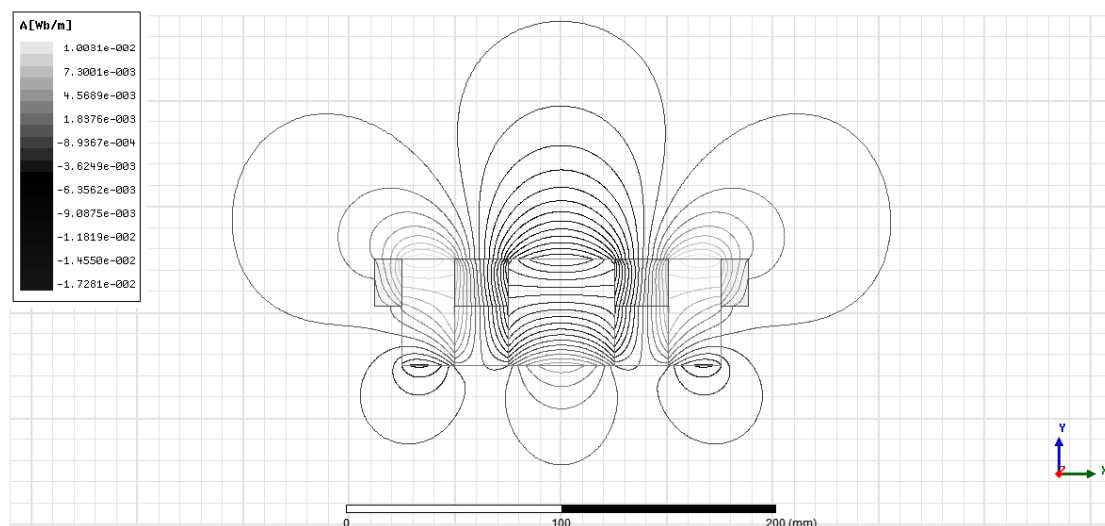


Figura 14 - Linhas de campo produzidas pelo trilho.

A Figura 15 mostra um diagrama do trilho com os ímãs que o compõem, suas orientações, as dimensões do sistema e os três sistemas de coordenadas (*Coordinate System* - CS) sobre os quais o laço 2G é centrado durante os ensaios.

Deve-se notar que, embora o trilho possua uma distribuição simétrica de campo magnético, serão realizados ensaios em CS1 e CS3. O laço 2G possui um lado mais alto que o outro, o que certamente levará a diferenças no comportamento do laço sobre esses dois sistemas de coordenadas. Uma alternativa ao CS3 seria realizar outro ensaio sobre CS1, mas girando o laço 2G em 180° sobre o eixo z, o que resultaria na mesma posição do laço 2G em relação à distribuição de campo do trilho. Decidiu-se utilizar o CS3, entretanto, por ser de execução mais prática e rápida.

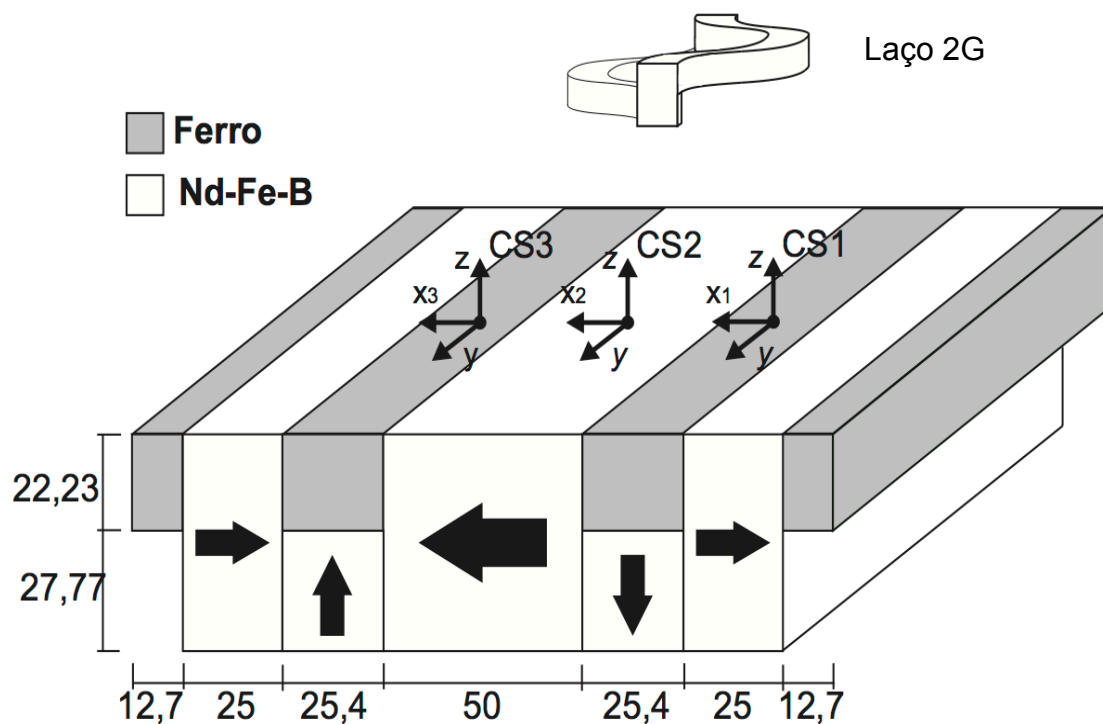


Figura 15 - Trilho magnético usado para ensaios de força e laço 2G. Em cinza, ferro e, em branco, ímãs Nd-Fe-B. Todas as distâncias estão em milímetros.

4.1.3. Ímã cilíndrico

Além do trilho magnético, foi utilizado um ímã cilíndrico com um campo magnético de densidade magnética menor que a do trilho. Este ímã foi utilizado em ensaios de força complementares e no ensaio de mapeamento do campo no laço 2G. Trata-se de um ímã de neodímio-ferro-boro encapsulado em uma estrutura de alumínio que pode ser vista na Figura 16. As dimensões do ímã são 20 mm de altura e 75 mm de diâmetro. O ímã possui uma força coercitiva de 998 kA/m e um fluxo remanente de 1,198 T.

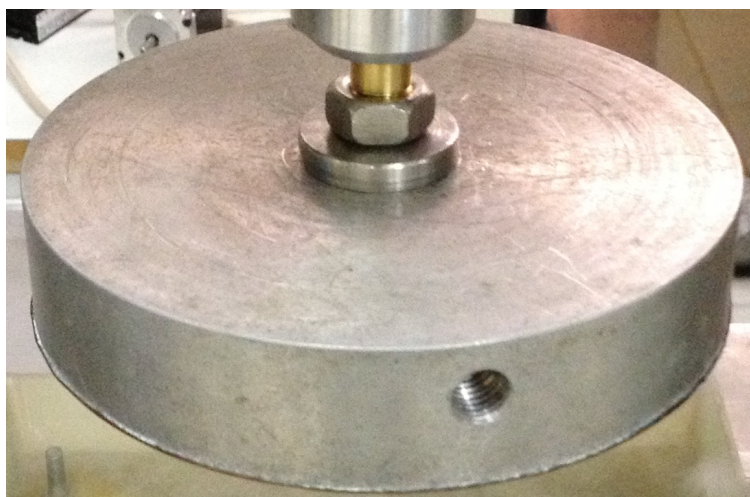


Figura 16 - Caixa de alumínio que contém o ímã cilíndrico utilizado em ensaios de força e mapeamento de campo.

4.1.4. Célula de carga

Para a medição das forças que atuam no laço 2G imerso nos campos magnéticos dos ímãs apresentados nas seções anteriores, foi utilizada uma célula de carga da *ATI Industrial Automation*, modelo *Delta SI-660-60*. Ela pode ser vista na montagem para um dos ensaios realizados na Figura 13. Maiores detalhes sobre a célula de carga podem ser encontrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados da célula de carga *Delta SI-660-60*.

Fundo de escala			Resolução		
F_x, F_y (N)	F_z (N)	T_x, T_y, T_z (Nm)	F_x, F_y (N)	F_z (N)	T_x, T_y, T_z (Nm)
660	1980	60	1/8	1/4	10/1333

4.1.5. Software de controle da bancada

Foi utilizada uma rotina para o ambiente *Labview* para realizar a comunicação para comando do sistema de movimentação e aquisição de dados da célula de carga. Além de parâmetros referentes à comunicação entre o computador e o sistema da bancada, o programa permite a escolha de diversos parâmetros acerca do controle do sistema, como velocidade e aceleração de cada eixo de movimentação. Há sub-rotinas programadas para cada tipo de ensaio de força.

4.1.6. Software de simulação Maxwell

Este trabalho também fez uso de simulações baseadas no método dos elementos finitos. Para realizar essas simulações, foi escolhido o programa *Maxwell* da *Ansys*, especializado na aplicação deste método a problemas de eletromagnetismo.

Com o programa escolhido, é possível modelar, simular e realizar diversos tipos de estudos sobre sistemas eletromagnéticos estáticos, variáveis no tempo ou no domínio da frequência. Os modelos podem ser em duas ou três dimensões e podem ter simetrias levadas em consideração para maior eficiência computacional.

Outro destaque é a geração da malha para solução do problema de forma automática em iterações adaptativas. Isso quer dizer que o algoritmo utilizado estima o erro nos nós para cada malha gerada, para então refinar a malha nas regiões de maior erro. A solução é novamente calculada para a nova malha até que tanto o erro quanto sua taxa de variação por iteração estejam abaixo de uma tolerância pré-determinada. Este processo é exemplificado pela Figura 17.

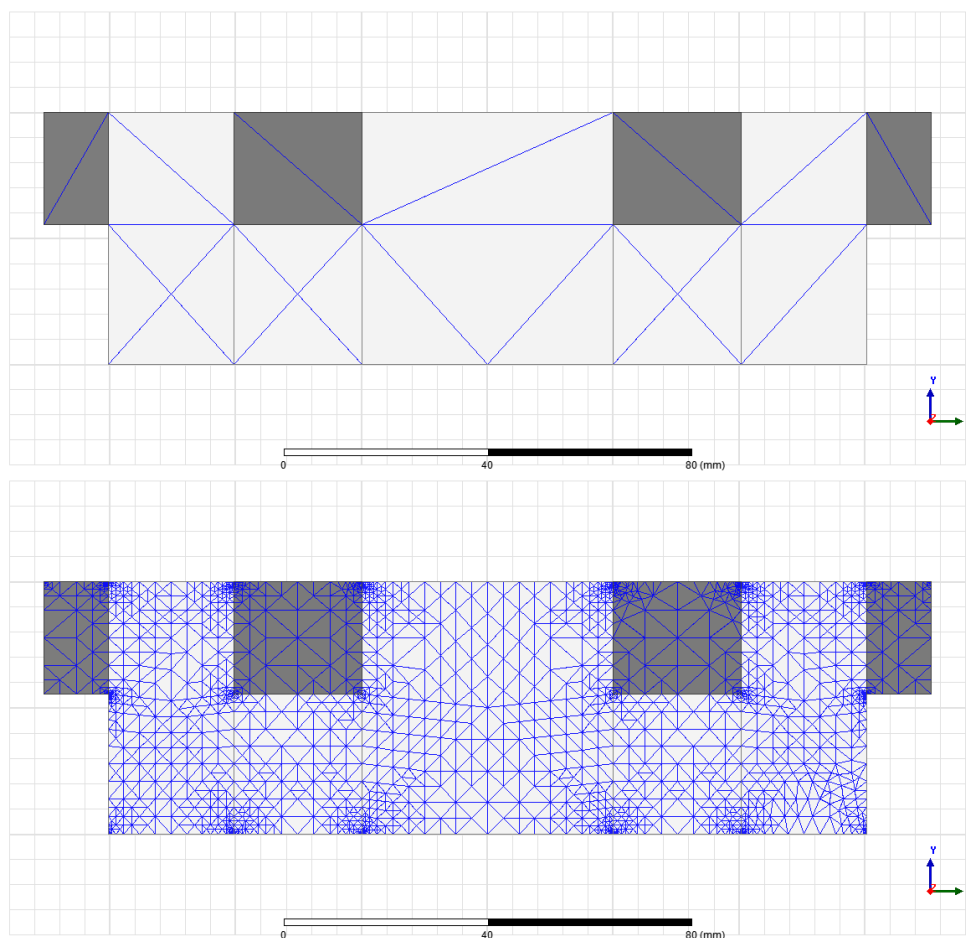


Figura 17 - Malhas utilizadas na segunda (em cima) e na décima quinta (embaixo) iteração da solução do trilha magnético 2D.

Foi utilizado o modo de solução para problemas magnetostáticos, onde há campos estáticos de origem, neste caso, por uma fonte de corrente contínua. Neste tipo de solução, o erro calculado é a soma das energias associadas aos erros de densidade de corrente

$$e_J = \vec{\nabla} \times \vec{H} - \vec{J}, \quad (2)$$

onde \vec{H} é o vetor intensidade de campo magnético calculado e \vec{J} , o vetor densidade de corrente determinado pela distribuição de corrente escolhida pelo usuário. Ou seja, o erro de densidade de corrente é o resíduo da lei de Ampère para campos estáticos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}. \quad (3)$$

Para maiores detalhes sobre o cálculo do erro de energia e o critério de parada utilizado pelo *Maxwell*, consultar (ANSOFT, 2009).

4.2. Metodologia

Caracterizar as forças atuantes é um dos mais importantes aspectos na investigação do desempenho de um mancal. Estamos basicamente interessados na força de levitação (força na direção vertical) e nas forças restaurativas laterais. Portanto, serão feitos diversos ensaios de força, de três tipos diferentes, descritos a seguir.

4.2.1. Zero Field Cooling (ZFC)

Neste ensaio, a peça supercondutora é resfriada fora da presença de um campo magnético, aqui considerado como sendo uma distância de 100 mm do trilho. Isso significa que haverá menos fluxo aprisionado, por isso espera-se que haja pouca estabilidade lateral. A força na direção vertical, entretanto, costuma ser maior nessas condições.

Primeiramente, é usado o arranjo com o trilho sobre a mesa de deslocamento lateral (Figura 13). À estrutura de deslocamento vertical, é presa a célula de carga e, a ela, a caixa de G10 com a amostra supercondutora montada. Dessa forma, a célula mede as forças e os torques aplicados ao laço 2G.

Ligado o sistema de alimentação dos motores da mesa, o computador é usado para movimentar a amostra para o CS1, CS2 ou CS3 (indicados na Figura 15). A movimentação vertical é feita pelo computador apenas até poucos milímetros

do trilho para, em seguida, girar-se manualmente o fuso que movimenta a estrutura até que a amostra encoste no trilho. Este procedimento evita que o motor pressione o laço 2G contra o trilho, danificando a amostra ou algum componente do sistema de movimentação.

Dessa forma, está definida a posição $z = 0$ do sistema. A amostra é então deslocada em 100 mm para cima, e o recipiente para comportar o nitrogênio líquido é montado sob ela. Enche-se o recipiente de nitrogênio líquido e espera-se o equilíbrio térmico por cerca de 5 minutos. Em seguida, toma-se a leitura da tara da célula de carga e dá-se início à rotina do ensaio, programada em *Labview*.

O programa feito em *Labview* leva a amostra de 100 mm a 5 mm de altura, depois de volta a 100 mm de altura. Isso é feito em passos de 1 mm, com um tempo de espera de 1 s entre cada passo, durante o qual dados de forças e torques são tomados da célula de carga e salvos em um arquivo de texto.

Deve-se notar que, a todo momento, durante o ensaio, parte do nitrogênio líquido está evaporando. Portanto, o sistema perde massa ao longo do ensaio, resultando em um erro na leitura de força vertical. Colocando um recipiente com nitrogênio líquido sobre uma balança, foi estimada uma taxa de evaporação de 1 g/s. Considerando o tempo de 1 s/passos do ensaio, temos uma duração total do ensaio de aproximadamente $2 \times 95 = 190$ s, o que leva a cerca de 0,19 kg de material evaporado e uma discrepância de $F = mg = 0,19 \times 9,81 \approx 1,9$ N ao fim do ensaio. Esta é apenas uma medida grosseira para estimar a ordem de grandeza do efeito da evaporação nos ensaios e não leva em consideração uma série de fatores que podem alterar esta taxa de evaporação.

Finalmente, após cada ensaio, o recipiente de nitrogênio líquido é esvaziado e espera-se 5 minutos para o reaquecimento do laço 2G. Esse reaquecimento deve ser apenas o necessário para que o material faça a transição de volta do estado supercondutor para o normal. Então, pode-se dar início aos preparativos para um novo ensaio.

Os ensaios de ZFC foram repetidos de diversas maneiras. Com o laço 2G posicionado de forma que seu eixo maior estivesse paralelo à direção y do trilho, foram realizados ensaios de ZFC centrados nos CS1, CS2 e CS3. Com o eixo maior do laço 2G posicionado perpendicularmente à direção y do trilho, o teste de ZFC foi realizado para os CS1 e CS2.

O ZFC também foi feito com uma configuração ligeiramente diferente. Com o ímã cilíndrico (seção 4.1.3) preso à estrutura de deslocamento vertical através da célula de carga e o laço 2G fixado à mesa através de um segundo recipiente para nitrogênio líquido, o ZFC foi repetido mais uma vez. A diferença nesse caso é que é

o ímã que é movimentado verticalmente, enquanto o laço 2G fica estático. A Figura 18 mostra uma fotografia dessa montagem.

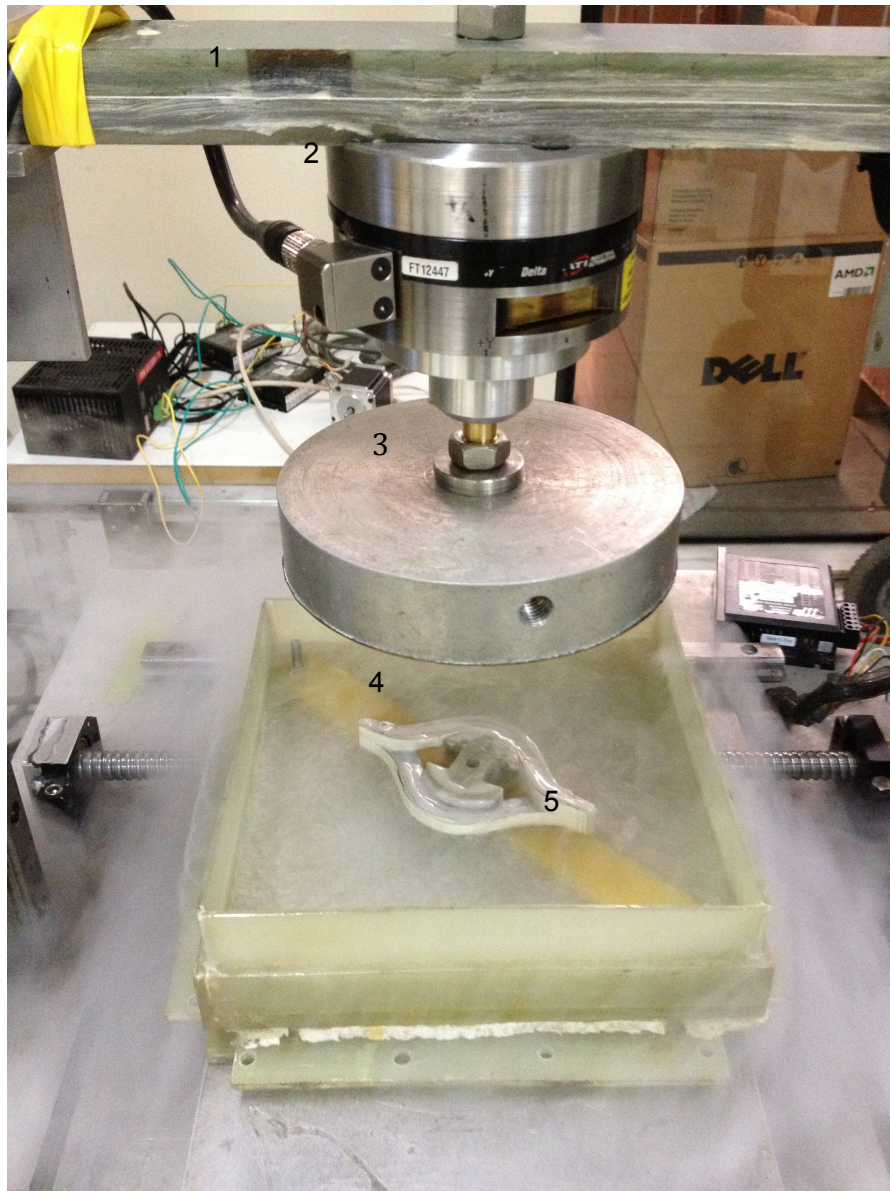


Figura 18 - Montagem para ensaio de força com ímã cilíndrico. Temos a Estrutura para movimentação vertical (1), a célula de carga (2), o ímã cilíndrico (3), o laço 2G (4) e o recipiente de nitrogênio líquido (5).

4.2.2. *Field Cooling (FC)*

O segundo tipo de ensaio de força realizado é o FC. Ele difere do ZFC, como o nome diz, nas condições de resfriamento. Enquanto no ZFC o laço 2G é resfriado a 100 mm do trilho, distância a qual seu campo é desprezível, no FC o resfriamento é feito a 30 mm ou menos do trilho. Nesse cenário, espera-se que haja mais fluxo

aprisionado nos vórtices do supercondutor, resultando em maior estabilidade lateral e menores forças de levitação.

O procedimento para o ensaio é o mesmo que o do ZFC. As únicas diferenças estão na altura inicial do ensaio e na rotina executada no *Labview*. A rotina para o FC leva o laço 2G da altura inicial a 5 mm, a 100 mm e de volta a 5 mm, quando o ensaio se encerra.

Com o laço 2G posicionado de forma que seu eixo maior estivesse paralelo à direção y do trilho, esse ensaio foi feito sobre o CS1 e o CS2. Já com o eixo do laço 2G posicionado perpendicularmente à direção y do trilho, o ensaio foi realizado apenas em CS1. O FC também foi repetido para a configuração que usa o ímã cilíndrico, da forma descrita na seção anterior.

4.2.3. Ensaios com movimentação lateral

Os ensaios com movimentação lateral compreendem ensaios de FC e ensaios de ZFC e são o último tipo de ensaio de força. Esse ensaio é feito exclusivamente na montagem com o trilho de ímãs.

Nesse ensaio, o laço 2G é resfriado a alturas entre 5 e 30 mm do trilho (FC) ou a 100 mm do trilho (ZFC), depois levado à altura de 5 mm acima do trilho. Após essa movimentação vertical, o trilho é movimentado lateralmente de $x_i = 0$ mm a $x_i = -10$ mm, a $x_i = 10$ mm e de volta a $x_i = 0$ mm. Esse ciclo de movimentação lateral é repetido 5 vezes seguidas.

Novamente, com o laço 2G posicionado de forma que seu eixo maior estivesse paralelo à direção y do trilho, esses ensaios foram realizados sobre o CS1 e o CS2. Já com o eixo do laço 2G posicionado perpendicularmente à direção y do trilho, os ensaios foram realizados apenas em CS1.

4.2.4. Simulação da força medida

O *software Maxwell* pode ser usado para tentar-se inferir a intensidade de corrente no laço 2G durante os ensaios de força. De posse de um modelo para o *Maxwell* do trilho magnético usado nos experimentos e do modelo em bloco desenvolvido para o laço 2G, ambos mostrados na Figura 19, pode-se ajustar, para cada posição do laço 2G, uma corrente aplicada ao laço 2G de forma que a força de *Lorentz* calculada na simulação seja igual à medida nos experimentos. A modelagem do laço 2G no *Maxwell* será detalhada na seção 5.2.3, onde fala-se das

simulações para comparação com os experimentos de mapeamento de campo do laço 2G.

As simulações de força foram realizadas utilizando-se a função *Optimization* do *Maxwell*. Define-se a corrente sobre o laço 2G como um parâmetro de otimização e uma meta para a componente vertical da força de *Lorentz* exercida sobre o laço 2G. Posiciona-se o laço 2G a uma determinada distância do trilho, para um dos sistemas de coordenadas, e entra-se com a componente vertical da força medida para essa distância e sistema de coordenadas no ensaio realizado. O programa utiliza então um algoritmo de otimização, ajustando a corrente e solucionando o sistema até que a meta de força seja atingida.

Uma forma de verificar-se a eficácia do modelo para simulação da força medida é a comparação das outras componentes de força. Como apenas a componente vertical é dada como meta de ajuste, podemos comparar as componentes medidas e simuladas dos eixos do plano horizontal.

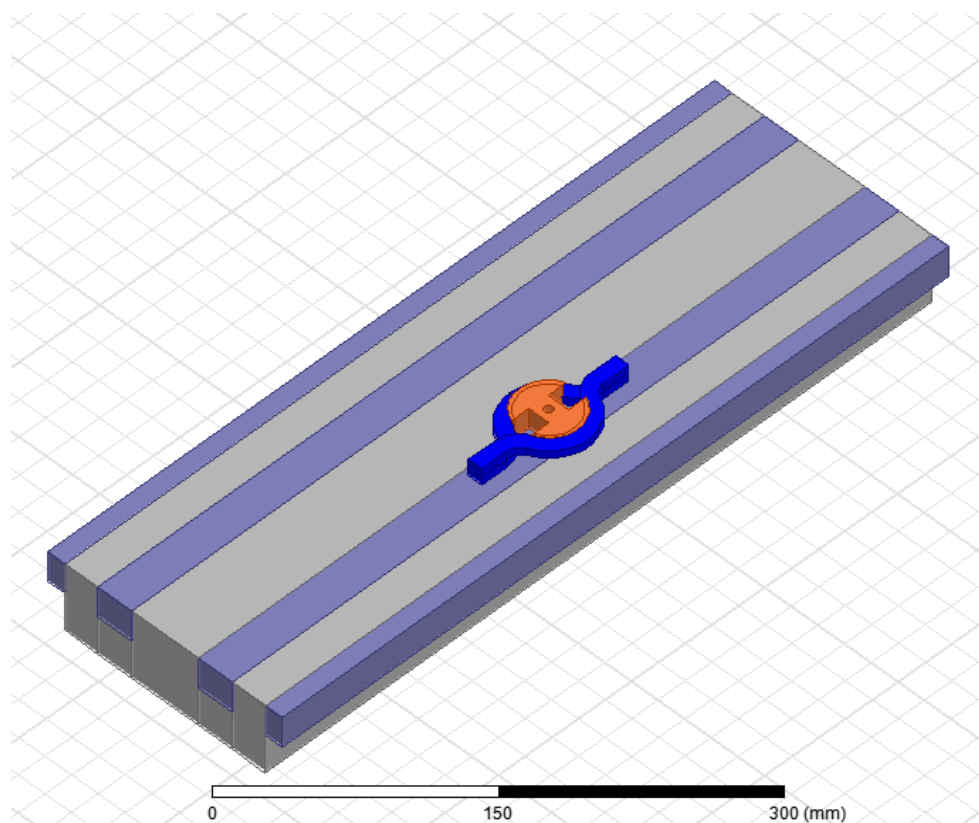


Figura 19 - Modelo tridimensional de trilho e laço 2G usado nas simulações de força.

4.3. Resultados e análise

Foi realizada uma grande variedade de ensaios de força. Serão mostrados gráficos de alguns desses ensaios representando as forças medidas nos três eixos

como função do deslocamento realizado. Os títulos dos gráficos indicam o tipo de ensaio, o sistema de coordenadas onde foi realizado, a posição do eixo maior da bobina em relação ao eixo y do trilho (paralelo ou perpendicular) e a grandeza representada. Em todas as medidas, os sensores foram zerados antes do início dos deslocamentos. Para maior clareza dos gráficos, um "x" marcará o início do experimento em cada curva de força.

Com o auxílio dos modelos criados no *Maxwell*, foi gerada a Figura 20. Ela mostra os posicionamentos e sistemas de coordenadas utilizados nos ensaios para ajudar na visualização dos mesmos e na compreensão de seus resultados. Para maior clareza, o lado mais alto da bobina está representado em azul escuro e o mais baixo, em azul claro.

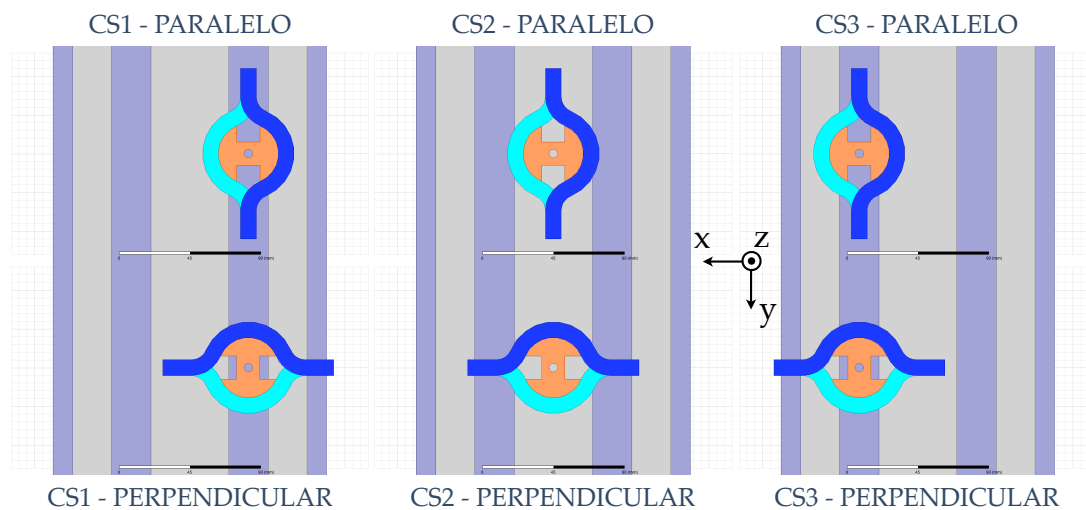


Figura 20 - Sistemas de coordenadas e posicionamentos do laço 2G utilizados nos ensaios.

4.3.1. Ensaios de ZFC

Na Figura 21, temos gráficos dos dados referentes aos experimentos ZFC sobre o trilho magnético apenas com deslocamento vertical. Essas medidas foram feitas com o eixo maior do laço 2G paralelo ao eixo y do trilho, sobre os três sistemas de coordenadas.

Fica evidente que, em CS1 e CS3, a componente majoritária é a componente vertical. O pico de força se altera ligeiramente entre esses dois casos, sendo o valor máximo, em CS3, no ponto de máxima aproximação, de 79,2 N. Em CS1, essa força é de 76,8 N.

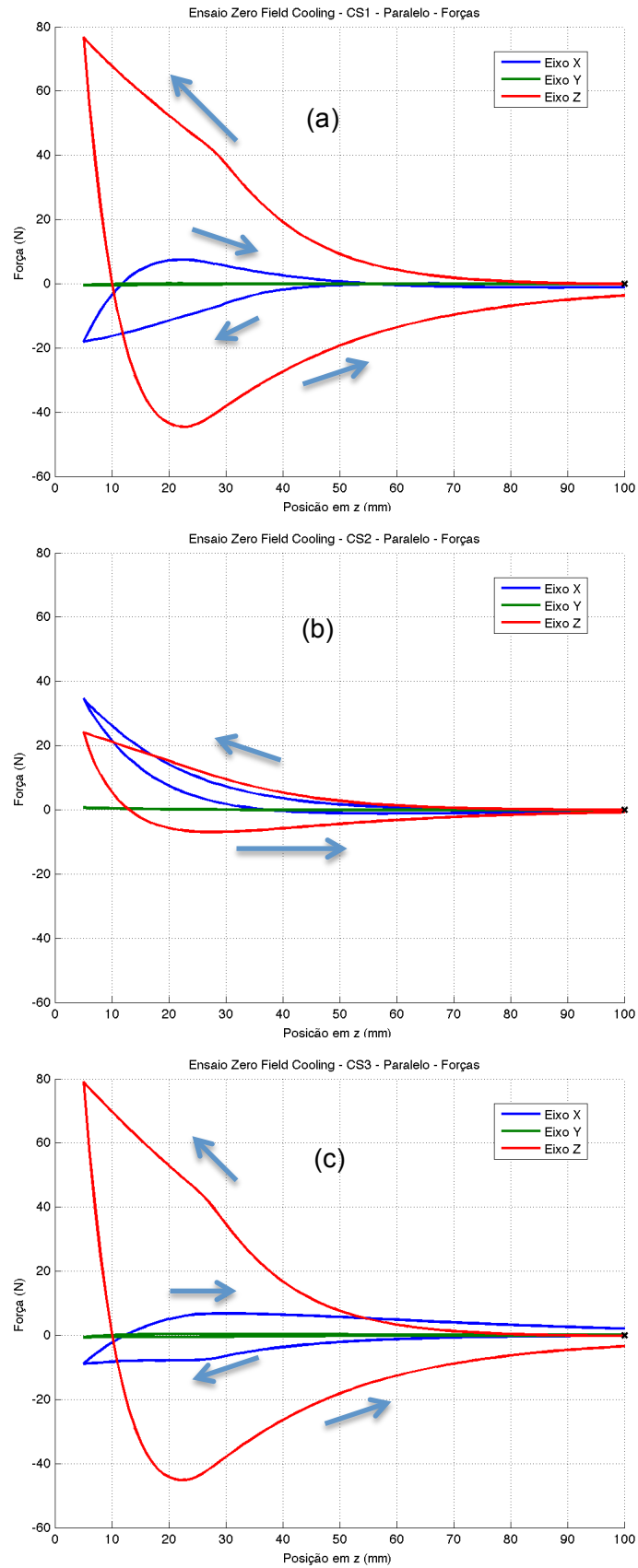


Figura 21 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de ZFC 100 mm → 5 mm → 100 mm em CS1 (a), CS2 (b) e CS3 (c).

Pôde-se observar histerese em todos ensaios de força. Tomando-se a curva do eixo z como exemplo, é possível fazer uma análise que pode ser estendida a diversas outras que serão apresentas nesta seção. No início do ensaio, o laço 2G é resfriado 100 mm acima do trilho magnético. Conforme a bobina se aproxima do trilho, a variação do fluxo magnético enlaçado por ela induz nela uma corrente crescente. A interação entre a corrente induzida e o campo magnético acarreta em forças, principalmente verticais. Além disso, conforme o campo magnético aumenta, aumenta o fluxo nelas aprisionado. No trajeto de subida do laço 2G, a variação de fluxo enlaçado ocorre no sentido oposto, induzindo correntes contrárias, diminuindo a corrente persistente e a força sobre o laço 2G. As forças de aprisionamento sobre os vórtices acarretam em forças no sentido contrário do movimento durante o trajeto de subida. No fim do trajeto, a força vertical não nula indica que ainda há fluxo aprisionado na bobina.

Outro aspecto de destaque nessas curvas é a inclinação das curvas do eixo z também em CS1 e CS3. A inclinação é, a princípio, crescente, mas apresenta uma súbita queda entre 25 e 30 mm e passa a ser constante. A forma da curva do eixo x também apresenta uma clara mudança entre os dois sistemas de coordenadas, embora em ambos também seja possível observar uma mudança de tendência (quebra) na inclinação da curva durante o percurso de descida do laço 2G. Pode-se notar que a quebra de inclinação ocorre aproximadamente no mesmo momento para ambas as curvas, do eixo x e do eixo z.

Uma possível explicação para esse comportamento é que a densidade de corrente crítica, que decai com o aumento da intensidade de campo magnético, tenha sido atingida pelo menos em algumas das fitas. Devemos lembrar que a corrente provavelmente não é a mesma em todas as fitas, havendo uma distribuição de corrente não uniforme na bobina. Como a força em cada ponto é proporcional tanto ao campo magnético quanto à densidade de corrente, espera-se que a força cresça de forma não linear inicialmente. A cada passo de aproximação do trilho, há indução de corrente devido à variação de fluxo magnético enlaçado pela bobina, aumentando a corrente persistente. Ao mesmo tempo, a intensidade do campo magnético aumenta. A mudança para uma inclinação constante indica que há uma mudança nessa progressão, possivelmente por atingir a corrente crítica em alguns dos laços.

No CS2, por outro lado, temos uma redução da força vertical e uma grande contribuição no eixo x. Nesse caso, a inclinação da curva do eixo z parece estabilizar-se, enquanto a do eixo x assume o comportamento crescente. Para os

três sistemas de coordenadas, as forças no eixo y mantiveram-se inexpressivas em relação aos outros eixos.

As forças observadas em CS2 podem ser melhor compreendidas tendo como referência a Figura 20, do posicionamento da bobina, e a Figura 14, das linhas de campo do trilho. Sobre o ímã central do trilho, a componente majoritária do campo magnético está na direção x . Assumindo um sentido qualquer de corrente circulante na bobina e calculando a direção da força de *Lorentz*, vemos que a parte inferior da bobina estará sujeita a uma força de componente vertical em um sentido, enquanto sua parte superior estará sujeita a uma força de componente vertical em sentido contrário. Como a parte inferior está mais próxima do trilho, sofrerá uma força mais intensa e essas componentes verticais não se anulam, como mostra a curva do eixo z da Figura 21 (b). As extremidades laterais da bobina, que passam sobre o ferro do trilho, estão imersas em um campo magnético majoritariamente vertical. Se compararmos as duas extremidades laterais, vemos que tanto o sentido da corrente (de direção y) quanto o sentido do campo magnético (de direção z) se invertem, de forma que seu produto vetorial possui o mesmo sentido em ambas as extremidades laterais. Assim, as forças em ambas extremidades laterais possuem a componente x de sentido igual, portanto não se anulam, mas se somam, como observado na Figura 21 (b).

Além das questões de cancelamento ou soma de forças, esperam-se forças de menor intensidade para o ensaio em CS2 porque as componentes verticais do campo na região central da bobina são pouco intensas. Dessa forma, a variação do fluxo enlaçado pela bobina é menor, resultando em menores correntes induzidas e, portanto, menores forças de *Lorentz*. Este ponto é válido para qualquer ensaio realizado sobre CS2.

Dado que a distribuição de campo do trilho é simétrica em torno do plano YZ de CS2, o ensaio de ZFC em CS3 foi realizado com o intuito de verificar a influência da posição das partes superior e inferior da bobina em relação ao trilho. Consideramos, pelos resultados obtidos, que a diferença não é significativa para os propósitos deste trabalho. Portanto, os ensaios seguintes não incluirão CS3.

Foram realizados também ensaios em CS1 e CS2 com o laço 2G posicionado de forma que seu eixo maior estivesse perpendicular ao eixo y do trilho. Não foram realizados ensaios deste tipo sobre o CS3, uma vez que, com o posicionamento perpendicular do laço 2G, não há mais diferenças entre CS1 e CS3.

As forças medidas sobre CS1 se encontram na Figura 22. Há uma clara queda do pico de força vertical em relação ao posicionamento paralelo do laço 2G, para cerca de 70 N. Pode-se notar também que a quebra na inclinação dessa curva

ocorre alguns milímetros abaixo da posição de quebra observada para o posicionamento paralelo. Finalmente, as forças no eixo x sofrem uma sensível redução.

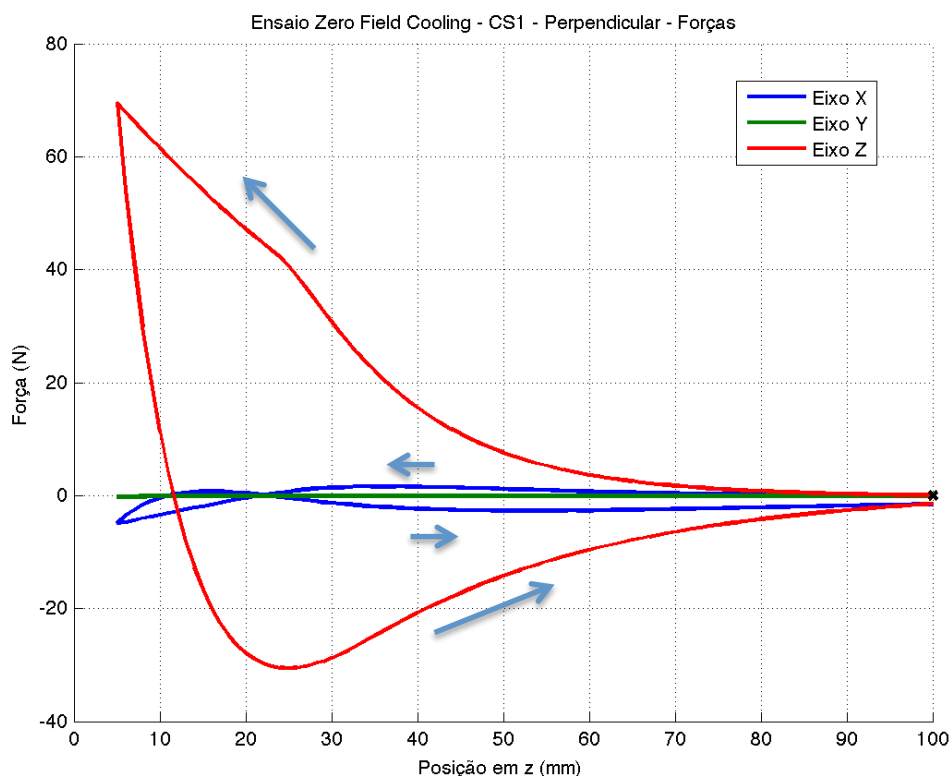


Figura 22 - Gráfico das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaio de ZFC 100 mm → 5 mm → 100 mm em CS1. Eixo maior do laço 2G perpendicular ao eixo y do trilho.

As medidas realizadas sobre o CS2 se encontram na Figura 23. Devido às baixas magnitudes das forças envolvidas neste ensaio, é possível observar o desvio na curva do eixo z causado pela evaporação do nitrogênio líquido através da diferença entre as forças medidas nos instantes inicial e final. Neste caso, essa diferença é inferior a 1 N, por isso não é significativa nos outros ensaios.

Esses baixos valores de força podem ser compreendidos ao observar o posicionamento do laço 2G neste ensaio e as linhas de campo do trilho (Figura 14). Utilizando-se a mesma metodologia de análise empregada na Figura 21, assumindo-se uma corrente circulante na bobina, vê-se que as forças de *Lorentz* sobre a bobina tendem a se cancelar. Neste caso, as forças de sentido contrário são aplicadas em duas partes da bobina a uma mesma altura, assim essas forças se cancelam. De fato, este método pode ser usado para compreender melhor todos os gráficos de forças apresentados.

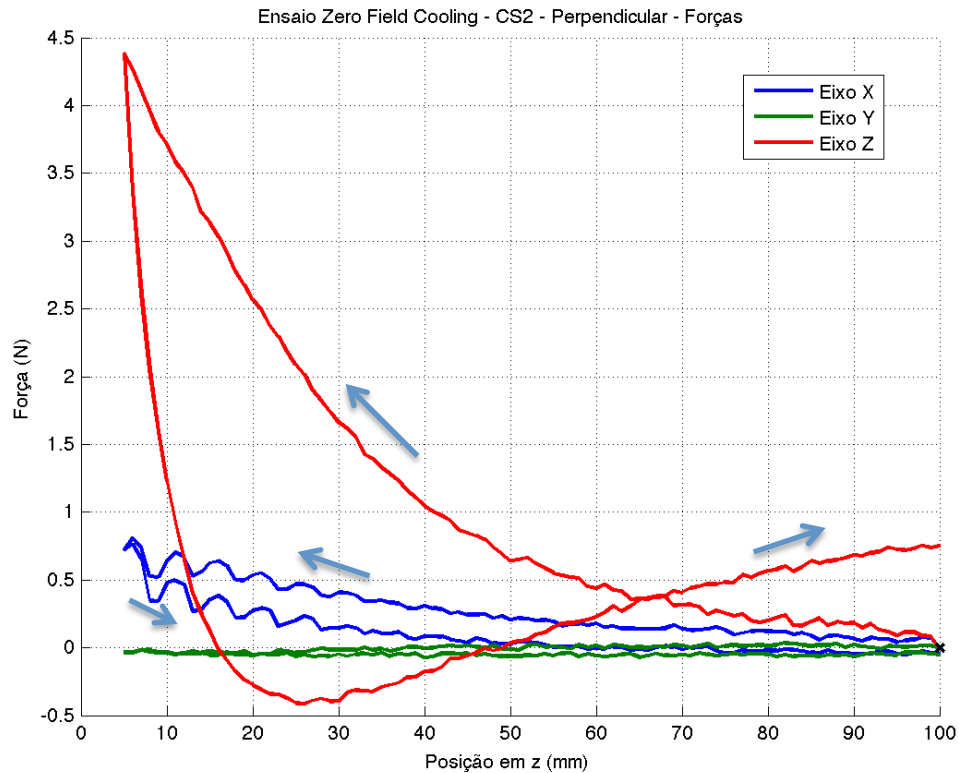


Figura 23 - Gráfico das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaio de ZFC 100 mm → 5 mm → 100 mm em CS2. Eixo maior do laço 2G perpendicular ao eixo y do trilho.

A Figura 24 mostra o resultado do ensaio de ZFC com o ímã cilíndrico. Os resultados com ímã cilíndrico são interessantes por possibilitarem a comparação com os resultados em (SASS, ANDRADE JR., *et al.*, 2012a) para mancais com fitas 2G empilhadas. A força vertical máxima nesse caso apresentou uma diferença menor que 10% em relação a (SASS, ANDRADE JR., *et al.*, 2012a), usando cerca de 1/3 de fita 2G.

Deve-se ressaltar que tanto este trabalho quanto (SASS, ANDRADE JR., *et al.*, 2012a) são resultados preliminares de mancais magnéticos com fitas 2G. Nesta fase de desenvolvimento, devemos analisar as vantagens e desvantagens de cada configuração, buscando a otimização deste tipo de mancal. Até o momento, o mancal baseado no laço 2G apresenta uma grande vantagem em relação ao de fitas empilhadas em termos de força de levitação por volume de material utilizado.

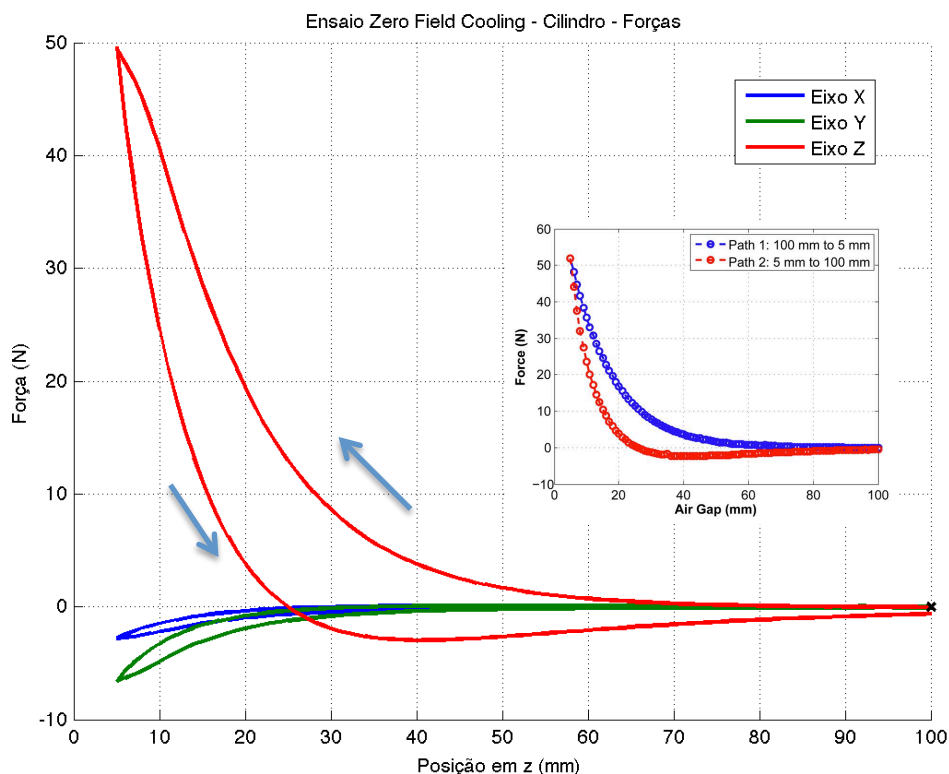


Figura 24 - Ensaio de ZFC realizado com ímã cilíndrico. Detalhe adaptado de (SASS, ANDRADE JR., *et al.*, 2012a) mostra resultado do mesmo ensaio para fitas empilhadas (apenas a força de levitação foi medida).

4.3.2. Ensaios de FC

Na Figura 25, temos os resultados de ensaios de FC em CS1 paralelo, para posições iniciais em 10, 20 e 30 mm, respectivamente. Nestes ensaios, também foi observada a quebra na inclinação da curva do eixo z. Nos ensaios de 20 e 30 mm, essa quebra acontece tanto no início, quanto no final do trajeto, enquanto no ensaio de 10 mm, essa quebra acontece apenas no final do trajeto.

Observando-se o ensaio iniciado em 10 mm, vê-se picos diferentes no primeiro e no segundo trajeto de descida do laço 2G. No início do ensaio, já há fluxo enlaçado pela bobina. A variação de fluxo decorrente da descida até 5 mm, portanto, não é tão grande. Após a subida até 100 mm, entretanto, parte do fluxo aprisionado é perdido, de forma que a força decorrente de sua interação com o campo do trilho cai para menos que 2 N. Na descida seguinte, até 5 mm, portanto, a variação de fluxo enlaçado na bobina é maior que na primeira descida, induzindo maiores correntes e acarretando em forças mais intensas.

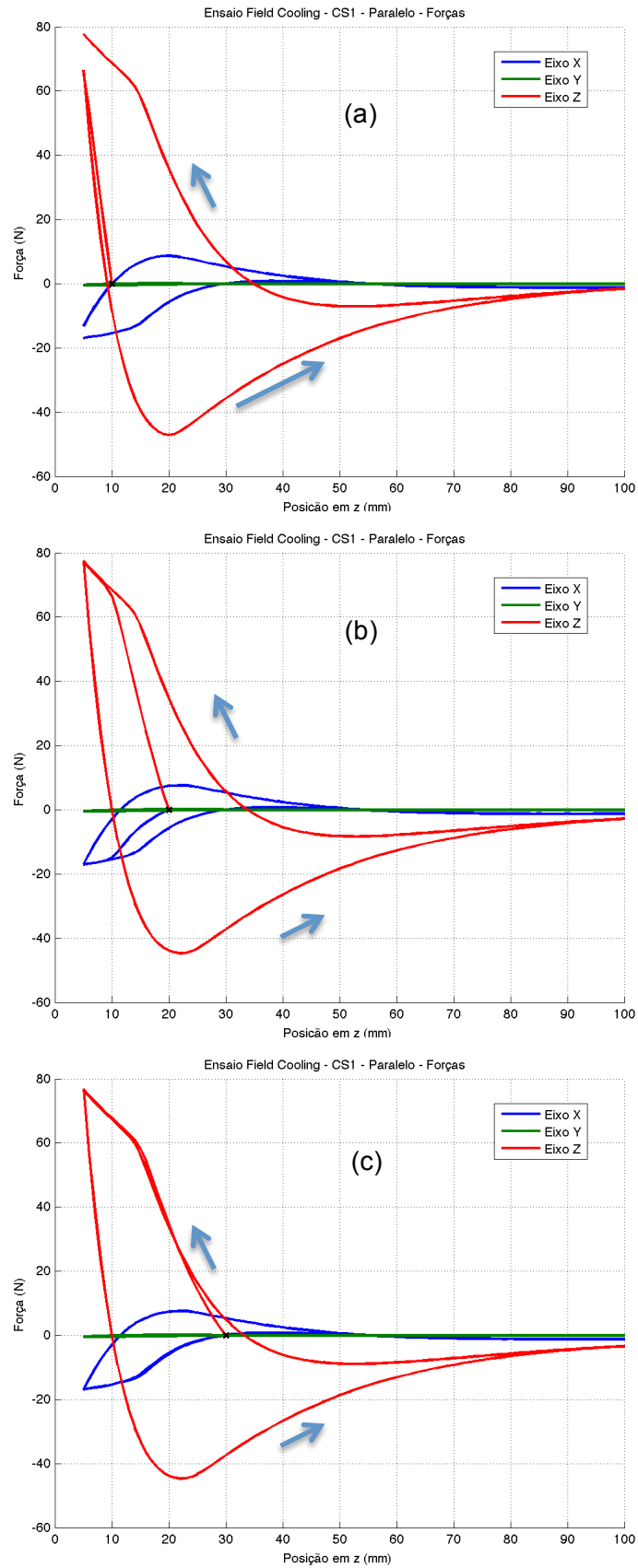


Figura 25 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de FC em CS1, com resfriamento a 10 (a), 20 (b) e 30 mm (c) de altura.

A força máxima observada é aproximadamente a mesma que nos ensaios de ZFC, o que indica que praticamente todo o fluxo aprisionado é perdido quando o laço 2G se afasta do trilho. As curvas do eixo x também apresentam comportamento semelhante ao observado nos ensaios de ZFC, com quebras de inclinação simultaneamente às quebras nas curvas do eixo z. Esses gráficos mostram uma redução muito pequena (de até 1,8%) na força máxima em z conforme a posição de resfriamento aumenta.

A Figura 26 mostra os resultados de FC para o CS2 com resfriamento em 20 e 30 mm. Com o aumento da posição de resfriamento, houve um aumento da componente x, enquanto a componente vertical manteve seu valor de pico. Os ensaios de FC em CS2 repetem a tendência apresentada nos ZFC em CS2, onde a componente x apresenta uma inclinação crescente, enquanto a inclinação da componente vertical tende a se estabilizar.

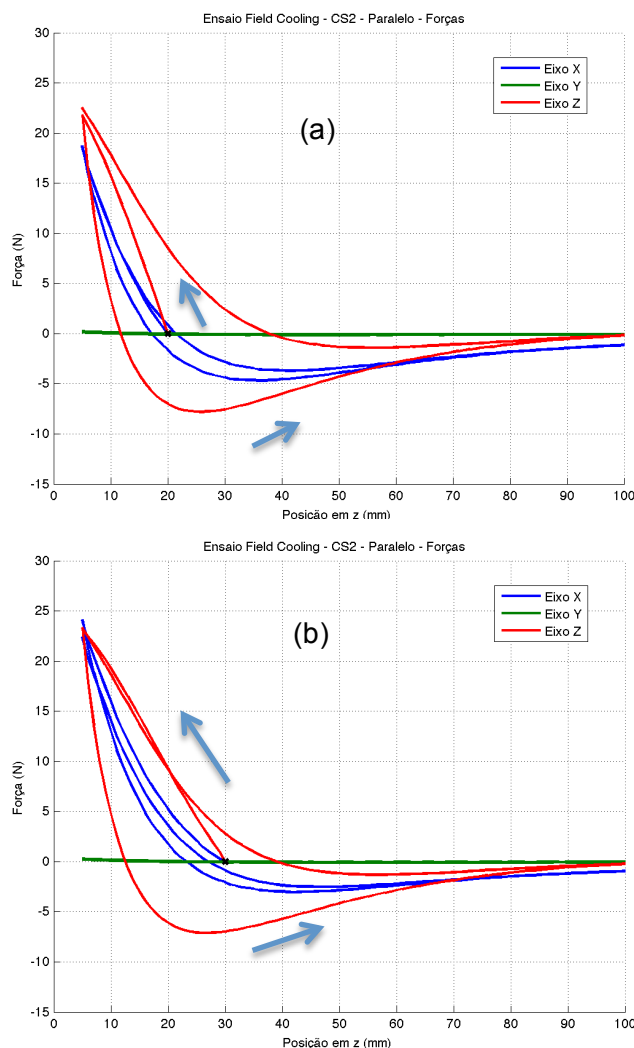


Figura 26 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de FC em CS2, com resfriamento a 20 (a) e 30 mm (b) de altura.

Na Figura 27, temos os ensaios de FC realizados com o ímã cilíndrico. Novamente, podemos comparar esses resultados com os de (SASS, ANDRADE JR., *et al.*, 2012a). Para as três distâncias de resfriamento, 10, 20 e 30 mm, os ensaios realizados apresentaram força vertical máxima maior que em (SASS, ANDRADE JR., *et al.*, 2012a). Lembrando, novamente, que o laço 2G construído no presente trabalho utilizou cerca de 1/3 do material utilizado no bloco de fitas empilhadas construído em (SASS, ANDRADE JR., *et al.*, 2012a).

Nota-se nos gráficos de ensaio de FC com o ímã cilíndrico que não houve quebra na inclinação da força vertical. Esse fato corrobora a tese de que a estabilização da inclinação das curvas se deve à aproximação do limiar da corrente crítica devido ao alto campo presente no trilho magnético.

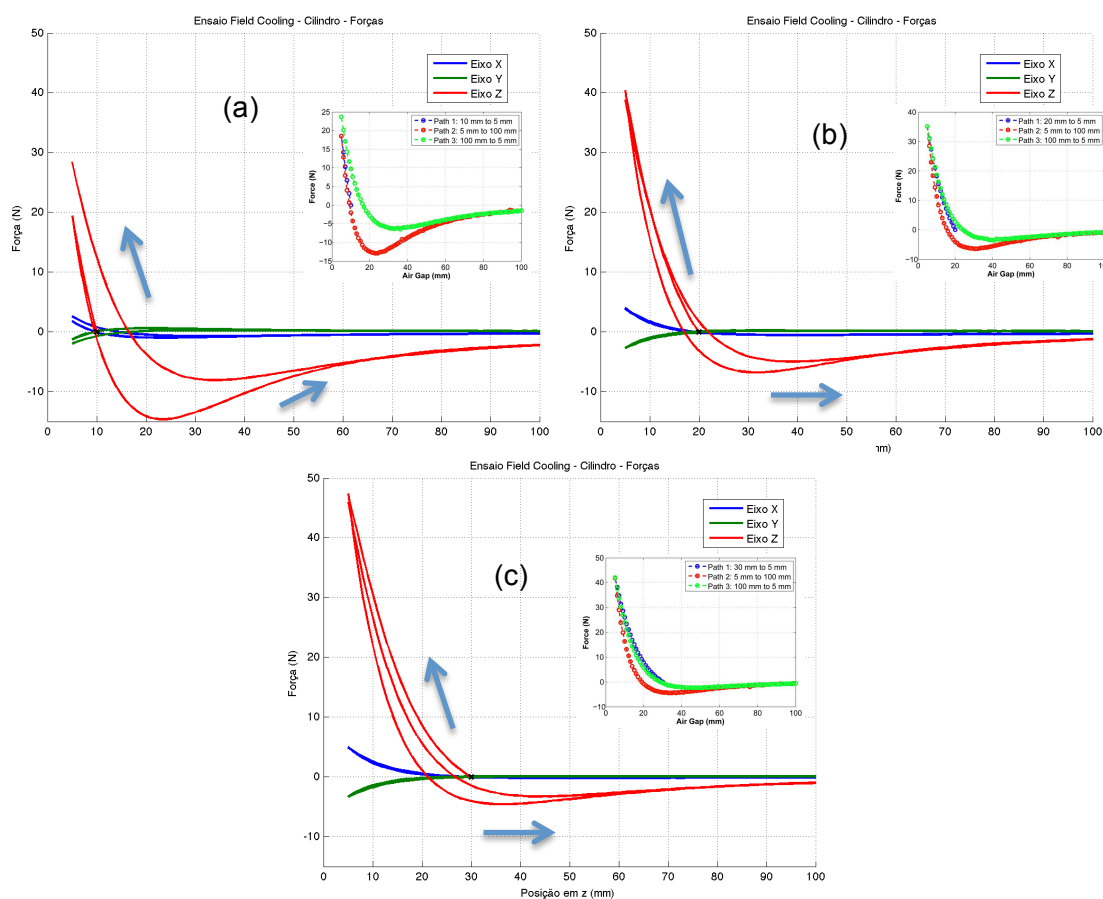


Figura 27 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de FC com ímã cilíndrico e resfriamento a 10 (a), 20 (b) e 30 mm (c) de distância. Detalhe adaptado de (SASS, ANDRADE JR., *et al.*, 2012a) mostra resultado do mesmo ensaio para fitas empilhadas (apenas a força de levitação foi medida).

4.3.3. Ensaios com movimentação lateral

A seguir, serão mostrados os resultados de maior importância para a estabilidade lateral do mancal. A Figura 28 contém os gráficos com as forças devidas à movimentação lateral para FC a 5, 10, 20 e 30 mm do trilho e para ZFC, a 100 mm do trilho em CS1.

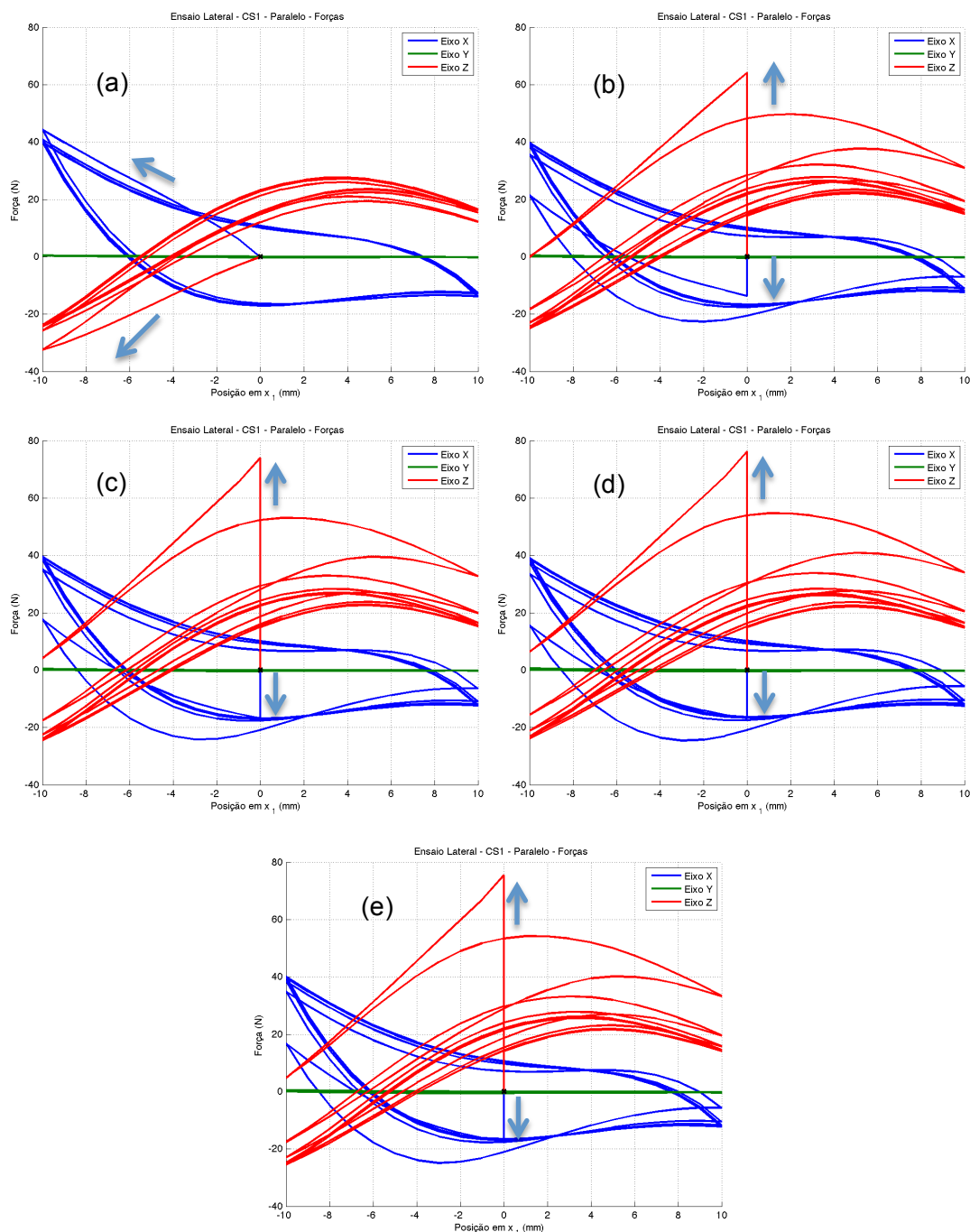


Figura 28 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de FC lateral com resfriamento em 5 (a), 10 (b), 20 (c), 30 mm (d) e de ZFC lateral (e) na posição CS1 paralela.

Podemos observar como a repetição dos ciclos leva a um laço de histerese bem definido. Além disso, a inclinação de F_x nos pontos de cruzamento com o eixo das abcissas indica pontos de equilíbrio estável. É interessante notar também que um desses pontos de equilíbrio na direção x é praticamente coincidente com um dos pontos de equilíbrio relativos à força vertical F_z .

No ensaio de 5 mm (a), não há movimentação vertical. Nos outros ensaios, o laço 2G é resfriado a uma determinada altura, abaixado até 5 mm e iniciam-se os ciclos de movimentação lateral. O trecho no gráfico em que as forças se mantêm em uma reta vertical corresponde à movimentação vertical da bobina. Não há grandes alterações entre esses gráficos, exceto pela força alcançada durante a movimentação vertical.

Essa grande similaridade entre os ensaios de movimentação lateral realizados na posição CS1 paralela parece indicar que, após um grande número de ciclos, as condições de resfriamento não influenciam a resposta do laço 2G. De fato, vemos que os ciclos de histerese que parecem se definir após alguns ciclos são os mesmos entre todos os ensaios. Eles possuem os mesmos pontos de interseção com o eixo das abcissas (mesmos pontos de equilíbrio) e, em geral, valores muito similares de força ao longo da curva, formando, com efeito, a mesma curva de histerese.

Ensaio laterais também foram realizados em CS1 para o laço 2G posicionado perpendicularmente ao eixo y do trilho. Estes resultados estão apresentados na Figura 29. A curva x em (a) apresenta dois pontos de equilíbrio estável e um possível ponto de equilíbrio instável, próximo à posição central.

Ao comparar o gráfico (a) com os demais, temos, à primeira vista, um comportamento diferente do observado quando o laço 2G estava na posição paralela. Os laços de histerese aparentam bastante diferentes daqueles com resfriamento a 5 mm, inclusive com pontos de equilíbrio bem diferentes: há pontos de equilíbrio instável entre 0 e 2 mm e pontos de equilíbrio estável entre -8 e -10 mm. É possível, entretanto, que estes laços de histerese se aproximem mais daqueles observados no primeiro ensaio após um número maior de ciclos, uma vez que apresentam grande variação entre cada passada. De fato, as curvas parecem se aproximar daquelas observadas no primeiro ensaio a cada passada.

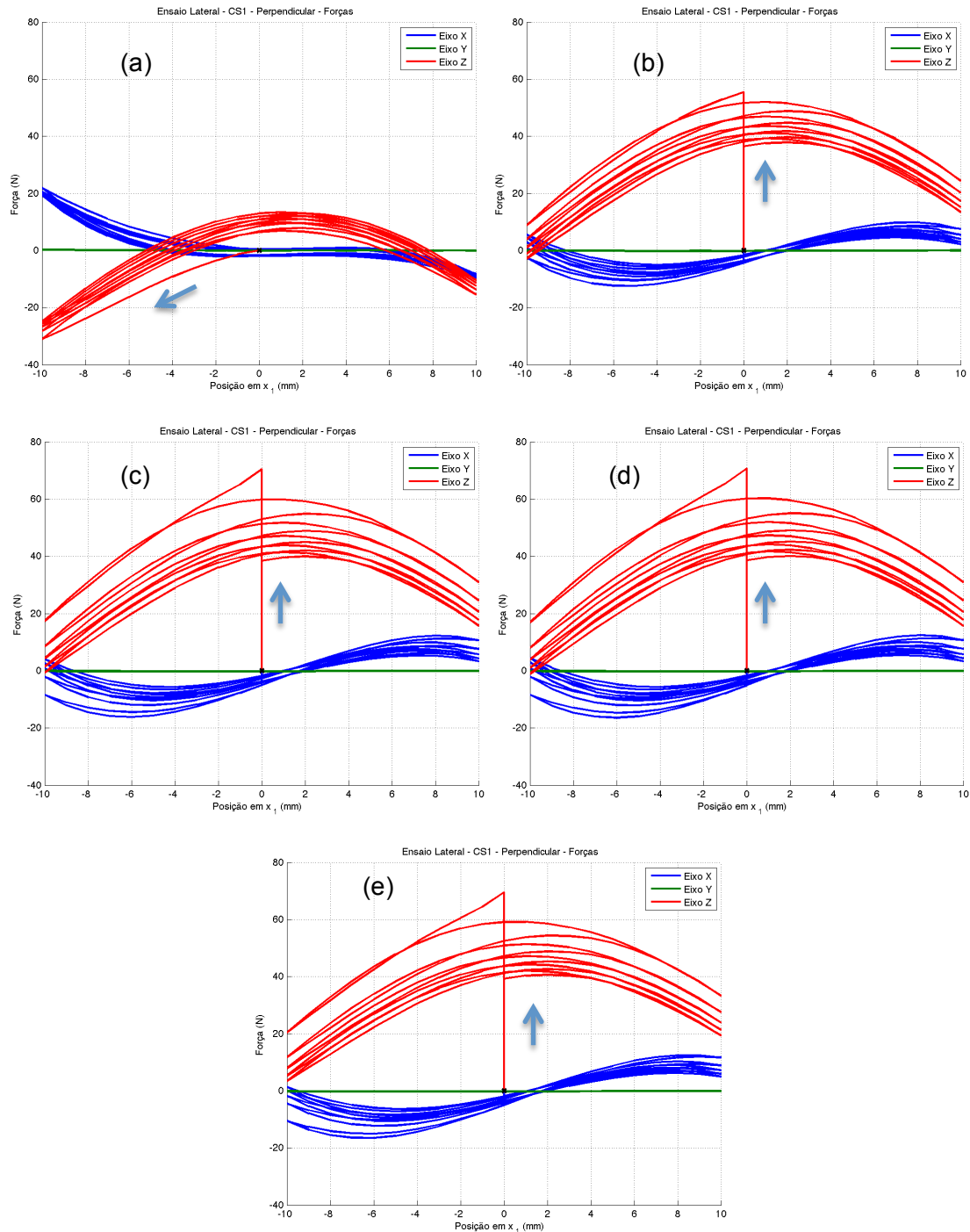


Figura 29 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de FC lateral com resfriamento em 5 (a), 10 (b), 20 (c), 30 mm (d) e de ZFC lateral (e) na posição CS1 perpendicular.

A Figura 30 apresenta os resultados dos ensaios de FC lateral sobre o CS2, na posição paralela (não foram realizados ensaios em CS2 na posição perpendicular devido às pequenas forças já constatadas). Como já observado nos ensaios de FC e ZFC, o CS2 possui predominância das forças no eixo x, chegando a quase 80 N.

Novamente, há duas posições de equilíbrio estável, uma delas praticamente coincidente com um ponto de equilíbrio vertical. No gráfico para resfriamento a 5 mm (a), não é possível distinguir a progressão dos laços de histerese, tendo ocorrido uma rápida convergência para um laço bem definido no primeiro ciclo. Nos outros gráficos, é possível novamente observar a convergência para um mesmo laço de histerese, independentemente das condições de resfriamento.

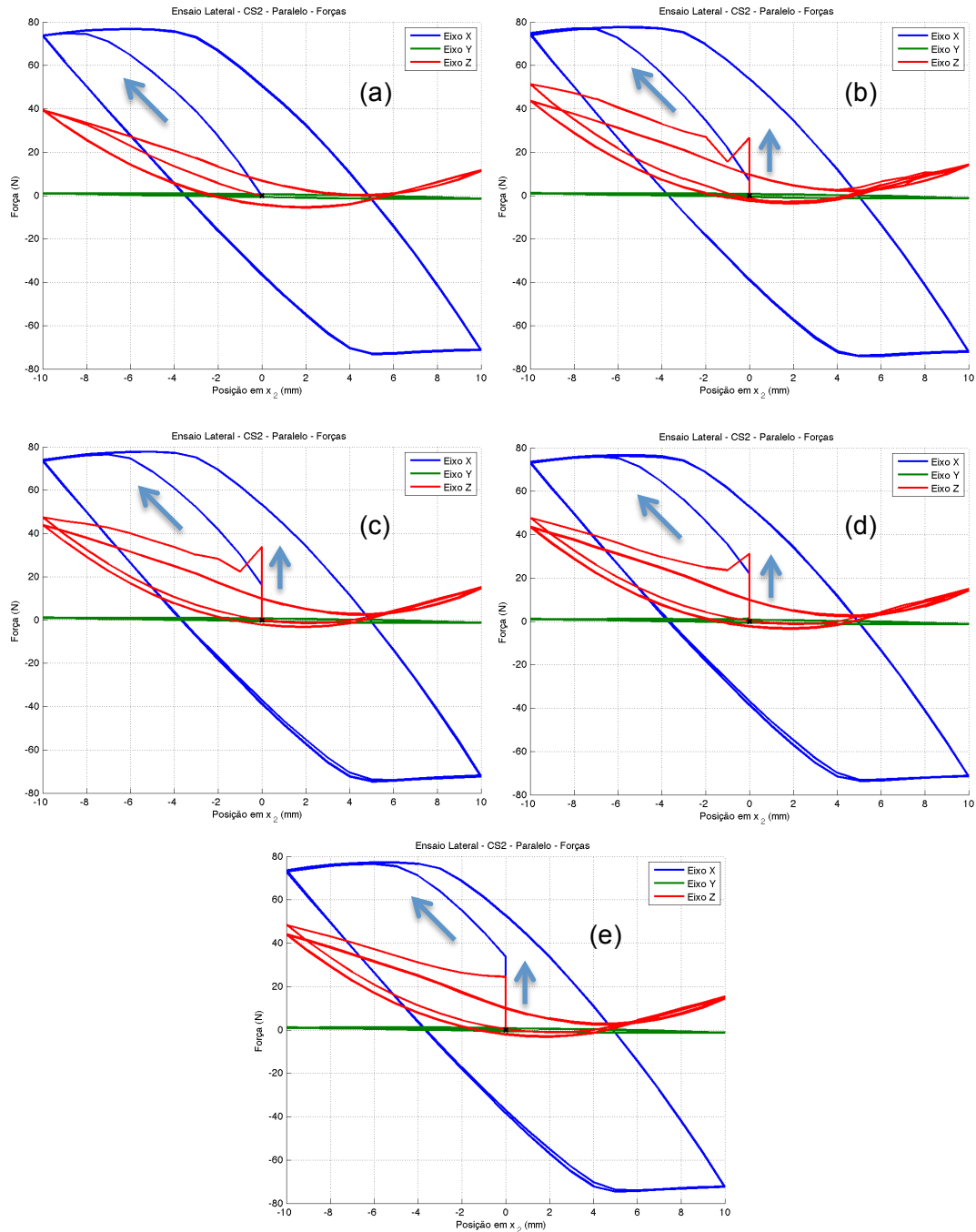


Figura 30 - Gráficos das três componentes de força sobre o laço 2G durante ensaios de FC lateral com resfriamento em 5 (a), 10 (b), 20 (c), 30 mm (d) e de ZFC lateral (e) na posição CS1 perpendicular.

4.3.4. Simulações

De acordo com a seção 4.2.4, para as simulações de força, foi tomado como referência o ensaio de ZFC paralelo em CS1. A Tabela 2 mostra o ponto que tentou-se reproduzir na simulação.

Tabela 2 - Forças medidas em cada eixo e a magnitude total para o ponto mais próximo no ensaio de ZFC paralelo em CS1.

	Experimento			
z (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F (N)
5	-18,0	-0,466	76,8	78,8

A Tabela 3 mostra as forças encontradas nas simulações quando são aplicadas as correntes tal que a força vertical se iguale à medida, assim como quais foram as correntes utilizadas. Foram calculados, em seguida, os erros relativos aos valores experimentais de cada componente de força simulada, o que pode-se ver na Tabela 4.

Tabela 3 - Forças e corrente resultantes do ajuste da corrente do laço 2G em simulação, de forma a igualar F_z a valor medido.

	Simulação				
z (mm)	I (A)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F (N)
5	24,5	-28,4	0,00408	76,9	82,0

Tabela 4 - Erro relativo $(F_{sim} - F_{exp})/F_{exp}$ calculado para cada componente.

	Erro relativo (%)			
z (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F (N)
5	57,8	-101	0,130	3,92

A

Tabela 4 mostra um erro baixo, menor que 1%, para a componente vertical da força sobre o laço 2G. Isso era esperado, pois a corrente usada na simulação foi ajustada para que essa componente se igualasse à medida experimental. Para as componentes x e y dessa força, entretanto, os erros foram altíssimos, sendo o menor de 57,8%. Deve-se levar em conta que a força F_y do ensaio foi da ordem da resolução do sensor (0,125 N para os eixos x e y).

Conclui-se, a partir da Tabela 4, que este método não é eficaz para estimar-se a corrente circulante na bobina durante os ensaios de força. Este resultado era esperado pela simplicidade do modelo utilizado. Na simulação, o laço 2G foi modelado como um condutor de cobre maciço. Essa abordagem influencia a distribuição de corrente resultante na bobina. Como a força sobre cada elemento de corrente depende da densidade de corrente e do campo magnético sobre ele, fica evidente que a distribuição de corrente decorrente desse modelo não é adequada, levando a forças resultantes diferentes das observadas.

5. Ensaaios de mapeamento de campo

Neste capítulo, será exposta toda a parte do trabalho referente aos ensaios de mapeamento do campo magnético sobre o laço 2G após a indução de uma corrente persistente. Ele é dividido em uma seção de equipamentos e recursos, uma seção de metodologia e uma última de exposição de resultados e análise dos mesmos.

5.1. Equipamentos e recursos

Em parte deste trabalho, fez-se necessário o mapeamento de campos magnéticos. Para essa tarefa, foi utilizada a mesa de mapeamento de campos magnéticos (FERNANDES, 2011) do LASUP (Figura 31). Seus componentes serão detalhados nas seções seguintes. Também foram utilizados os equipamentos descritos nas seções 4.1.1, 4.1.3 e 4.1.6 dos ensaios de força.

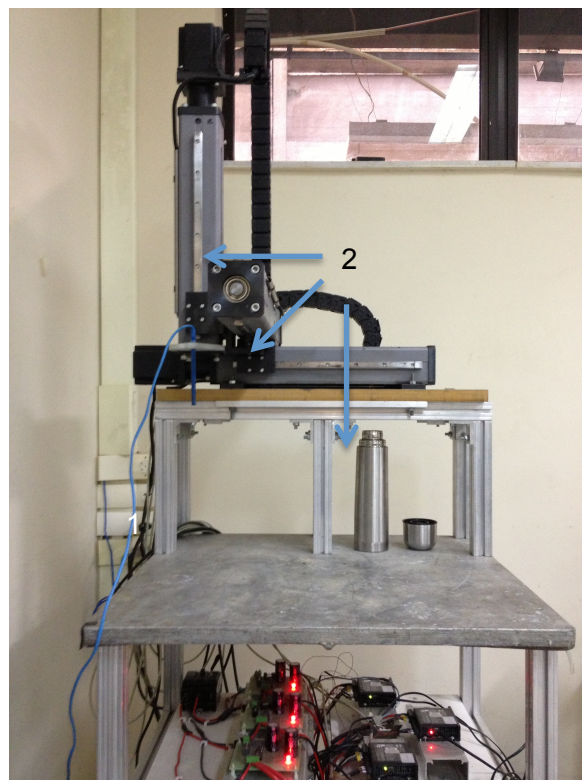


Figura 31 - Mesa de mapeamento de campo magnético. Em destaque a ponteira com o sensor (1), os eixos de movimentação (2) e os circuitos de alimentação e acionamento dos motores (3).

5.1.1. Sistema de movimentação

Para a realização de um mapeamento automatizado de um campo em uma região do espaço pré-definida, é necessário um sistema de movimentação controlado por *software*. Este sistema é capaz de mover o sensor em três eixos.

Novamente, o sistema é dotado de um circuito de alimentação, acionadores dos motores, os motores de passo e o *hub* de comunicação com a porta serial do computador. Os motores movimentam um sensor ao longo de três trilhos dispostos ao longo dos três eixos.

5.1.2. Sensor de efeito *Hall*

Esse sistema se baseia no sensor de efeito *Hall* CYSJ106C do fabricante *ChenYang* para medir campos magnéticos. A folha de dados deste componente se encontra no Anexo, no capítulo 8.

Um sensor de efeito *Hall* tem o seguinte princípio de funcionamento: uma corrente é aplicada entre dois terminais do sensor, que está imerso em um campo magnético. A componente do campo magnético perpendicular ao plano do sensor exercerá uma força de *Lorentz* sobre a corrente que atravessa o sensor e perpendicular à direção da própria corrente. Dessa forma, uma diferença de potencial se forma na direção perpendicular à corrente. Mais dois terminais permitem a medição dessa diferença de potencial que, em uma determinada faixa de operação, será proporcional ao campo magnético medido. A Figura 32 ilustra esse conceito. Como o nosso sistema só utiliza um sensor, medimos apenas uma componente do campo magnético, a componente vertical.

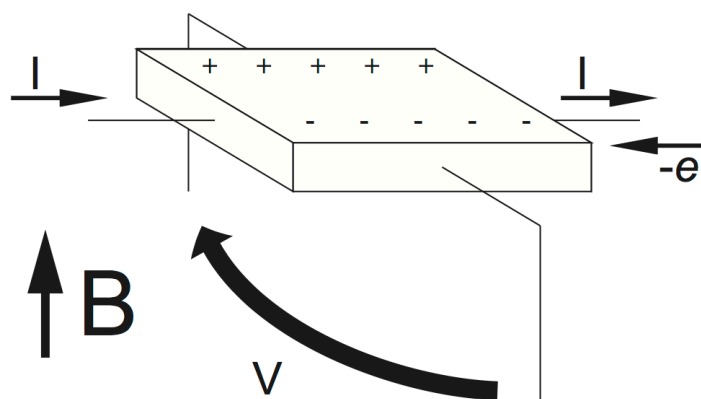


Figura 32 - Ilustração do princípio de funcionamento de um sensor de efeito Hall. Com o sensor imerso em um campo magnético B , uma corrente externa I (fluxo de elétrons $-e$ no sentido contrário) é fornecida. A tensão V é o sinal de saída.

O sensor utilizado possui 4 terminais, 2 de alimentação e 2 que transmitem o sinal de saída. Nessa implementação, o sensor foi alimentado com uma tensão fixa de 5 V.

5.1.3. Amplificador e sistema de aquisição

O sinal de saída do sensor é muito baixo, entre 110 e 150 mV, por isso utiliza-se um amplificador antes de sua entrada no sistema de aquisição do computador. O amplificador utilizado foi um amplificador de instrumentação encapsulado no circuito integrado (CI) INA122.

O circuito está montado em uma *protoboard* e seu diagrama esquemático pode ser visualizado na Figura 33. O ganho do amplificador é $G = 5 + \frac{200k}{R_G}$ e, como deixamos os terminais correspondentes a R_G em aberto, temos $G = 5$. Os terminais de saída do sensor de efeito *Hall* são conectados em V_{in+} e V_{in-} . O sinal amplificado é a tensão entre V_o e o terra.

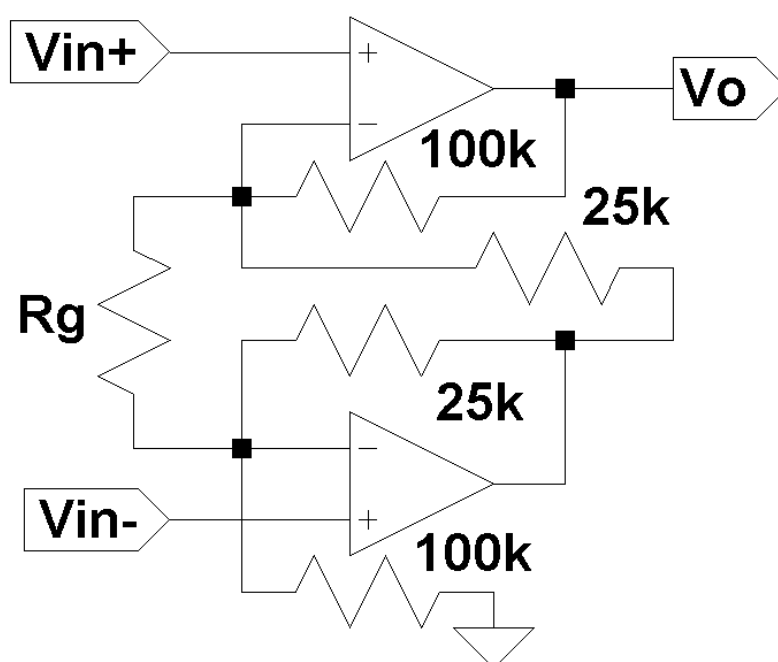


Figura 33 - Circuito do amplificador de sinal do sensor, o CI INA122.

5.1.4. Software de controle da bancada

O controle da mesa para mapeamento de campo magnético foi feito utilizando-se uma rotina para o ambiente *Labview*. Ela se encarrega da movimentação do sensor e aquisição de dados, permitindo a varredura de um

volume pré-determinado. Nesse trabalho, entretanto, será varrida apenas uma área, a altura dos pontos medidos será constante.

5.2. Metodologia

Materiais supercondutores possuem limites de densidade de corrente a partir dos quais deixam de apresentar as propriedades supercondutoras. Isso corresponde, para as fitas, a limites de corrente. Como foi feito um rasgo nas fitas para a formação do laço de corrente, a área da seção pela qual a corrente circula foi reduzida, pelo menos, pela metade. Assim, esses limites de corrente também devem ser reduzidos à metade.

Um método investigado para medir a corrente persistente circulando no laço 2G foi o mapeamento da componente vertical do campo magnético gerado por essa corrente. O campo medido seria então comparado com o simulado usando o programa *Maxwell* (seção 4.1.6).

5.2.1. Indução da corrente persistente

Uma corrente persistente é induzida no laço 2G através da variação do fluxo magnético enlaçado por suas fitas. Com a montagem mostrada na Figura 34, que difere daquela da Figura 18 apenas pela ausência da célula de carga, o ímã é posicionado cerca de 4 mm acima do laço 2G. O sistema é então resfriando enchendo-se o recipiente de nitrogênio líquido e esperando-se cerca de 5 minutos por equilíbrio térmico.

Comanda-se a elevação do ímã a 5 mm/s até 200 mm do laço 2G. O afastamento do ímã faz variar o fluxo magnético enlaçado no laço 2G e induz forças eletromotrizes em suas espiras, o que resulta, por serem espiras supercondutoras, em correntes persistentes. O recipiente com o laço 2G é cuidadosamente transferido para uma mesa onde será realizado o mapeamento do campo magnético. Esperam-se 15 minutos entre a elevação do ímã e o início do mapeamento.

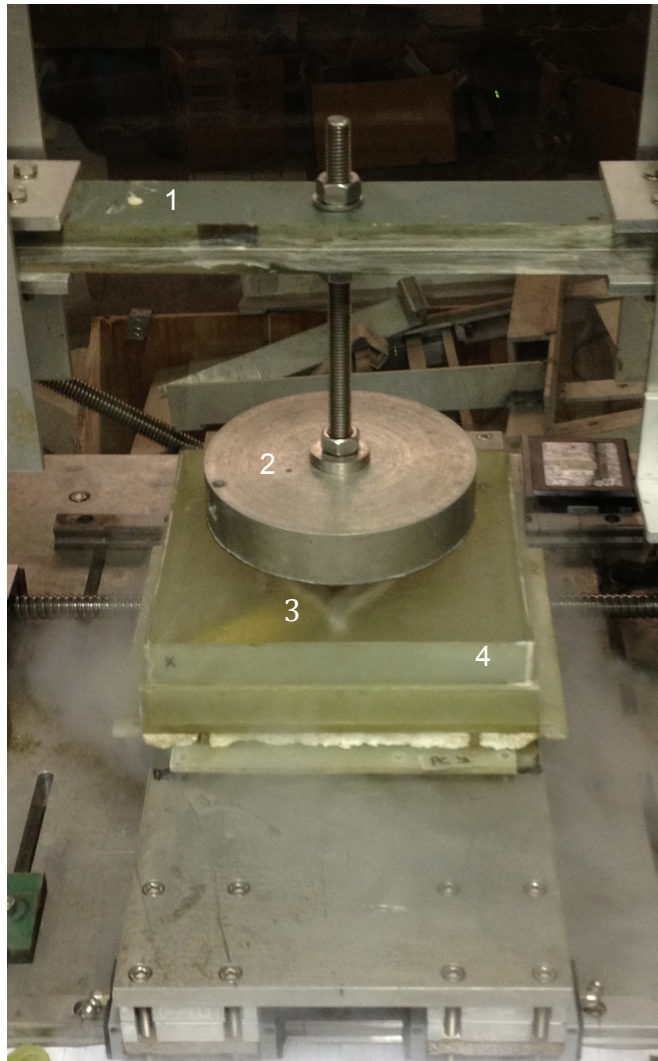


Figura 34 - Aparato montado para indução da corrente persistente. Temos a estrutura de movimentação vertical (1), o ímã cilíndrico (2), o laço 2G submerso (3), o recipiente para o nitrogênio líquido (4).

5.2.2. Mapeamento de campo

Com o laço 2G posicionado sobre a mesa de mapeamento de campo magnético (seção 5.1), utiliza-se a rotina em *Labview* para posicionar a ponteira do sensor a 3 mm de altura do laço 2G e na extremidade de um retângulo de 70 mm x 110 mm cujo centro coincide com o do laço 2G. Dá-se então início ao mapeamento do campo, que é feito com uma resolução de 2 mm sobre esse retângulo como pode ser visto na Figura 35.

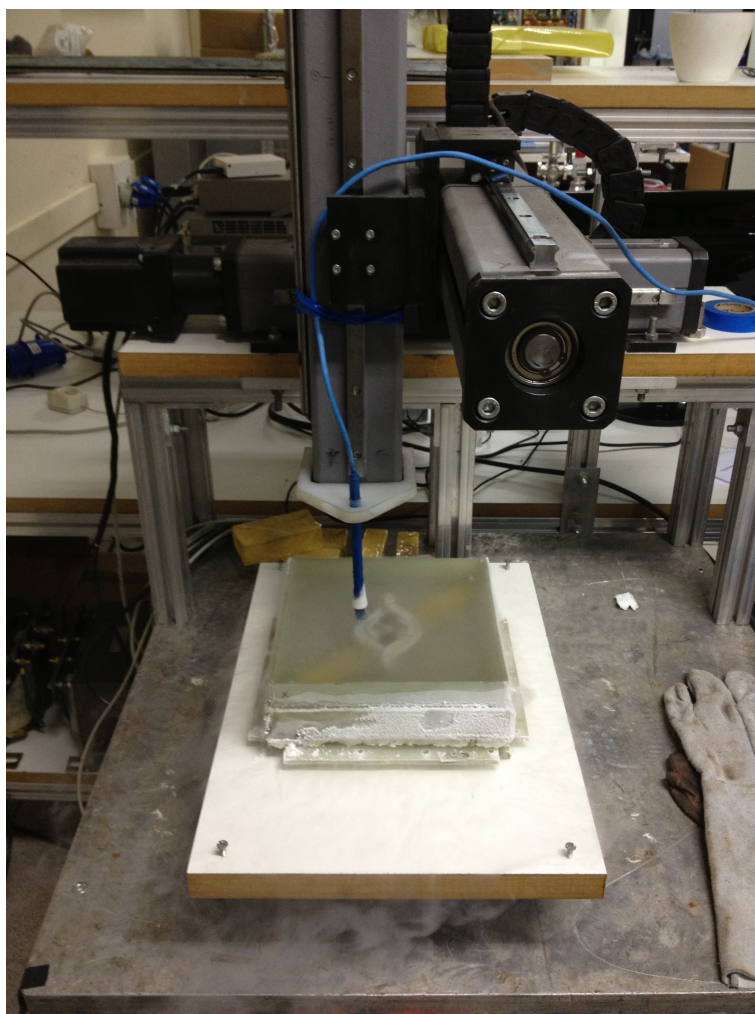


Figura 35 - Mapeamento do campo magnético sobre o laço 2G.

É medido, portanto, o campo magnético em $(70/2 + 1) \times (110/2 + 1) = 2016$ pontos, processo que leva cerca de 33 minutos, o que corresponde a cerca de 1 segundo por medida. Após o término dessa varredura, esperou-se uma hora e realizou-se uma nova varredura, obtendo-se outra medida do campo sobre o laço 2G.

5.2.3. Simulação do campo medido

Para quantificar a corrente persistente, modelos do laço 2G foram desenvolvidos com o programa *Maxwell* (seção 4.1.6). Aplicando-se uma corrente no modelo, pode ser calculado o campo magnético resultante para comparação com o campo medido. Como não há meios não lineares (de permeabilidade variável) nas proximidades do sistema, o campo medido deve ser proporcional à corrente persistente nas fitas supercondutoras. Logo, a comparação do campo simulado e medido nos permite inferir essa corrente média. Como, neste caso, o resultado não

depende de uma interação ponto a ponto entre densidades de corrente e a intensidade de um campo magnético externo, espera-se que este método seja mais confiável que o de simulação a partir das forças medidas nos ensaios (seção 4.3.4).

Devido à complexidade da geometria do laço 2G, composto por 100 condutores isolados entre si em um espaço de 10 mm, foram construídos dois modelos diferentes. O primeiro considera as 100 fitas como um bloco condutor único, de cobre, com a forma aproximada do laço 2G. Nesse modelo, apresentado na Figura 36, é aplicada ao bloco uma corrente 100 vezes maior que a corrente aplicada em uma fita.

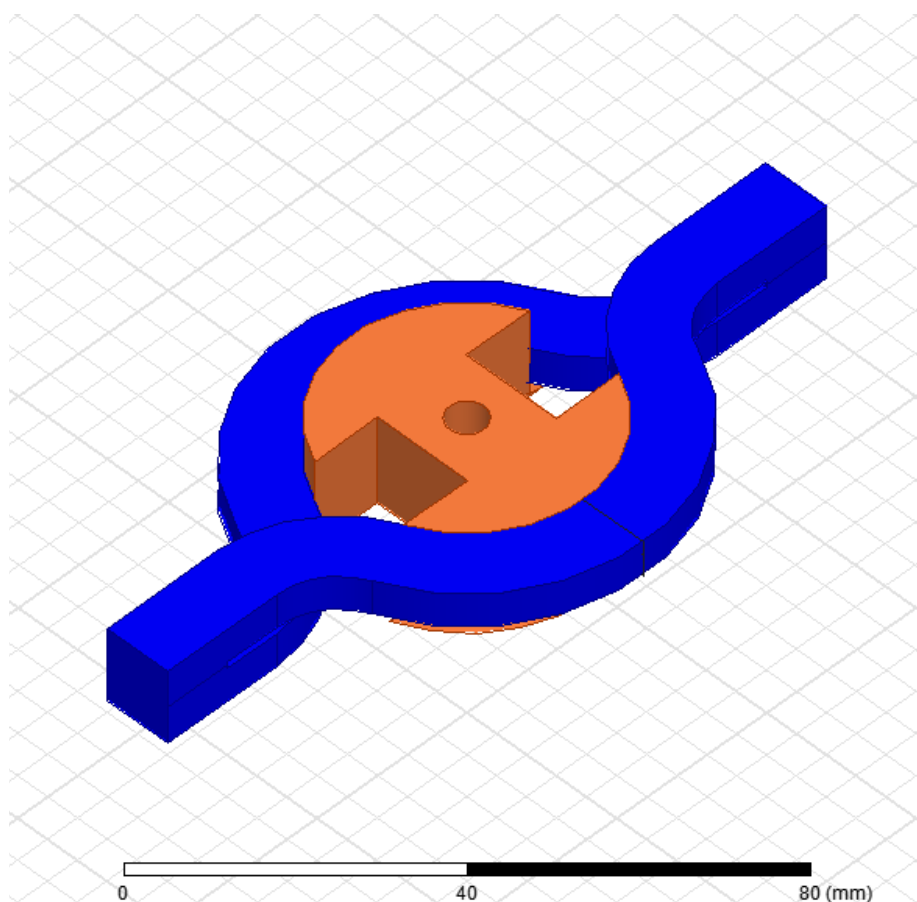


Figura 36 - Modelo tridimensional do laço 2G em bloco.

O segundo modelo possui apenas uma fita, modelada como um condutor de cobre de $50\text{ }\mu\text{m}$ em uma das extremidades do laço 2G (Figura 37). O campo é calculado considerando apenas essa fita sendo percorrida pela corrente determinada. Geram-se, a partir desse campo, 99 outras distribuições de campo, equivalentes à primeira, mas deslocadas no eixo x por $(10,125 - 0,05)/100 = 0,10075\text{ mm}$, sendo $10,125\text{ mm}$ a espessura (no eixo x) do laço 2G em bloco. Dessa forma, emulam-se as contribuições de cada uma das 100 fitas, que são somadas, utilizando-se o princípio da superposição para gerar-se o campo resultante.

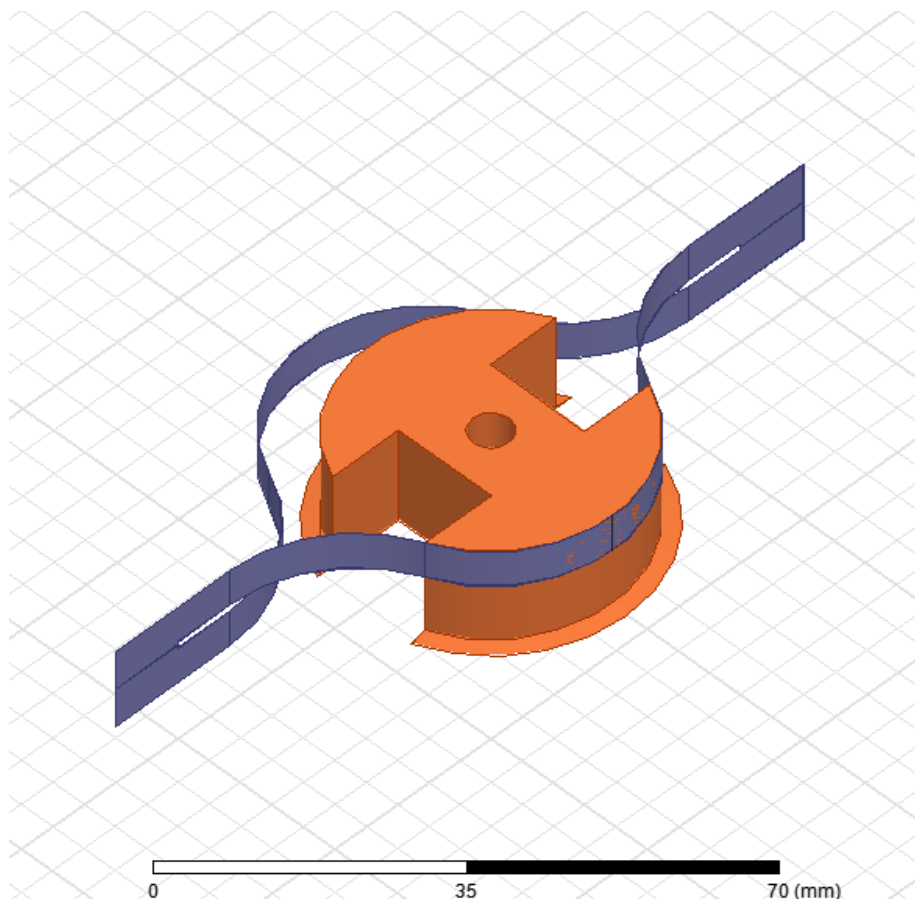


Figura 37 - Modelo tridimensional de fita individual.

O modelo da fita individual, por sua própria natureza, modela melhor o fato de que cada fita é eletricamente isolada das outras fitas do laço 2G. Com isso, podemos especificar correntes de diferentes intensidades em cada fita, refletindo uma distribuição de corrente não uniforme ao longo da seção do laço 2G. Entretanto, estamos considerando, como primeira aproximação, correntes de igual intensidade em todas as fitas.

O modelo do laço 2G em bloco, por sua vez, modela melhor a geometria do sistema físico. A fita mais interna e a fita mais externa formam curvas bem diferentes, de forma que uma fita no laço 2G real (e no modelo do laço 2G em bloco) não possui simetria em relação ao plano YZ, diferentemente do modelo de fita individual, onde uma fita simétrica é replicada 100 vezes. Isso pode ser melhor visualizado se compararmos a face lateral laço 2G em bloco (retirando uma "fatia" do bloco, que seria correspondente a uma fita) ao modelo de fita individual, o que é feito na Figura 38. Similarmente, a Figura 39 ajuda a visualizar o resultado final ao comparar o laço 2G em bloco ao laço 2G emulado pelo modelo de fita individual.

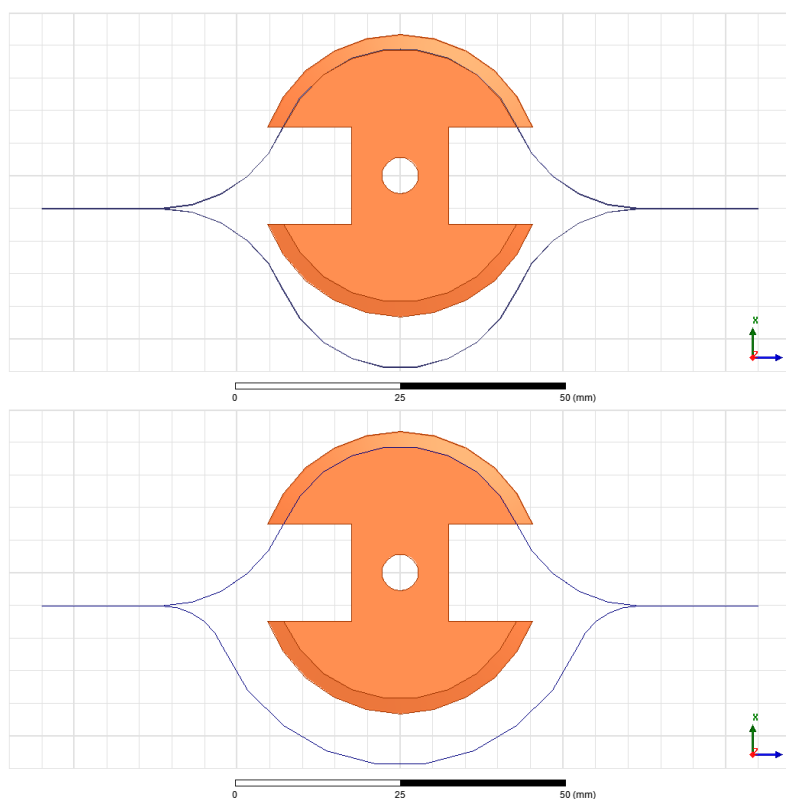


Figura 38 - Comparação entre fita equivalente do modelo de laço 2G em fita (em cima) e em bloco (embaixo).

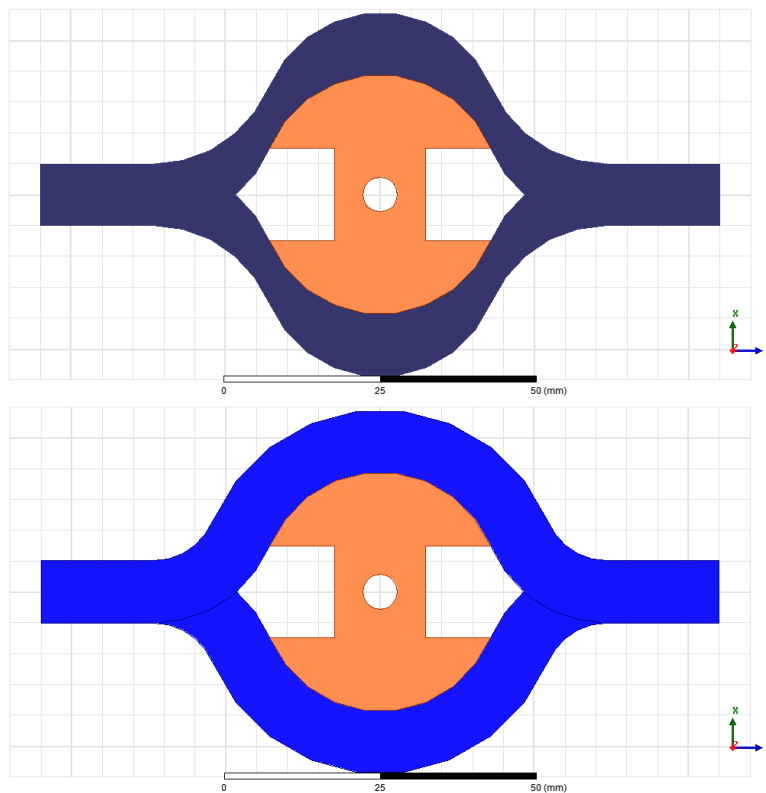


Figura 39 - Comparação entre modelo de laço 2G emulado através da replicação da fita individual (em cima) e laço 2G em bloco (embaixo).

Para realizar a comparação entre os campos simulados e os campos medidos, todos serão mapeados com a mesma resolução, limitada a 2 mm pelo tempo de ensaio, que aumenta conforme diminui-se a resolução. Por isso, a distribuição de campo da simulação do laço 2G em bloco é exportada sobre uma grade de 2 mm de resolução. A distribuição da fita individual, entretanto deve ser exportada com uma resolução de 0,10075 mm para posterior manipulação para aplicar a superposição das distribuições deslocadas. A distribuição resultante é interpolada com uma resolução de 2 mm.

De posse das distribuições de campo sobre uma mesma área e com igual resolução em simulações e experimentos, será feita uma análise sobre a topologia do campo. A correlação cruzada entre dois vetores é uma medida da superposição entre eles, como o produto escalar. Ela é, de fato, um indicador da correlação entre dois conjuntos de dados (WEISSTEIN) (NUMERICAL RECIPES SOFTWARE, 2008). Dados os vetores U e V de valores médios \bar{U} e \bar{V} e comprimento n , definimos a correlação cruzada entre eles como:

$$r = \frac{\sum_i^n (U_i - \bar{U})(V_i - \bar{V})}{\sqrt{\sum_i^n (U_i - \bar{U})^2} \sqrt{\sum_i^n (V_i - \bar{V})^2}}. \quad (4)$$

Definida dessa forma, uma correlação cruzada com valor unitário indica que os vetores estão alinhados, uma completa superposição entre os vetores. A correlação cruzada também pode ser interpretada como a qualidade do ajuste linear por mínimos quadrados a um conjunto de pares ordenados (U_i, V_i) . No caso de $r = 1$, um gráfico $U \times V$ resultaria em uma reta de inclinação positiva. Um valor nulo, por outro lado, indica completa desconexão entre os vetores.

Finalmente, será feita uma estimativa da corrente persistente no laço 2G durante os ensaios, a partir da comparação com os campos simulados. Será calculada a razão ponto a ponto entre campo medido e simulado em uma sub-região do campo mapeado onde a concordância entre a topologia dos campos medido e simulado seja maior, para que imperfeições do modelo 3D e incertezas da medida tenham menor influência no resultado. Será calculada a média entre essas razões, e, assumindo-se que o campo varia linearmente com a corrente no laço 2G, esse fator será tomado como a razão entre a corrente no laço 2G durante o ensaio e a corrente da simulação, que é conhecida. Também serão explorados os métodos de razão ponto a ponto sem seleção de uma sub-região e da razão entre os picos dos campos medido e simulado como a razão entre as correntes.

5.3. Resultados e análise

A seguir, serão expostos e analisados os resultados obtidos para os experimentos descritos neste capítulo. Entre eles estão a indução de uma corrente persistente na bobina, o mapeamento do campo magnético sobre ela, as distribuições de campo obtidas por simulação e a comparação entre experimento e simulação.

5.3.1. Ensaaios

O resultado dos mapeamentos de campo está representado na Figura 40. O primeiro mapeamento de campo teve início em t_1 , 15 minutos após o afastamento do ímã cilíndrico, e durou 33 minutos.

Deve ser observado que a medição é feita por fileiras em X e começa em Y_{\min} . Ou seja, o primeiro ponto medido é (X_{\max}, Y_{\min}) e o X varia até (X_{\min}, Y_{\min}) ; incrementa-se Y e varre-se uma nova fileira em X. Isso significa que a varredura é feita, se olharmos para os gráficos mostrados, da esquerda para a direita. Com esse detalhe em mente, a maior densidade do campo na região esquerda do gráfico parece indicar que há um decaimento da densidade do campo ao longo do tempo.

O início do segundo mapeamento deu-se em t_2 , 1 hora após o término do primeiro, portanto 1 hora e 48 minutos após o afastamento do ímã. O gráfico foi feito mantendo-se fixa a escala de cores usada para t_1 , de forma que é possível observar uma diminuição geral na densidade de campo.

Para observar o decaimento do campo, e portanto da corrente persistente no laço 2G, foi calculada a diferença entre os valores medidos em cada ponto $\Delta B_z(x, y, t_2) = B_z(x, y, t_2) - B_z(x, y, t_1)$, que está representada no terceiro gráfico da Figura 40.

Vemos, pela diferença entre as medições em t_1 e t_2 , que o decaimento máximo em $t_2 - t_1 = 93$ minutos foi menor que 6 mT. Observando, entretanto, a diferença entre os pontos (5,19) mm e (5,-19) mm em t_1 , temos uma diferença de aproximadamente 19 mT com cerca de 20 segundos entre as medidas. Portanto, fica claro que a diferença entre as regiões esquerda e direita dos gráficos de t_1 e t_2 não é devida ao decaimento ao longo do tempo da corrente persistente e do campo magnético, mas sim devida a uma imperfeição construtiva do laço 2G. Essa imperfeição deve afetar a distribuição de corrente no laço 2G, o que reflete no campo produzido pela mesma.

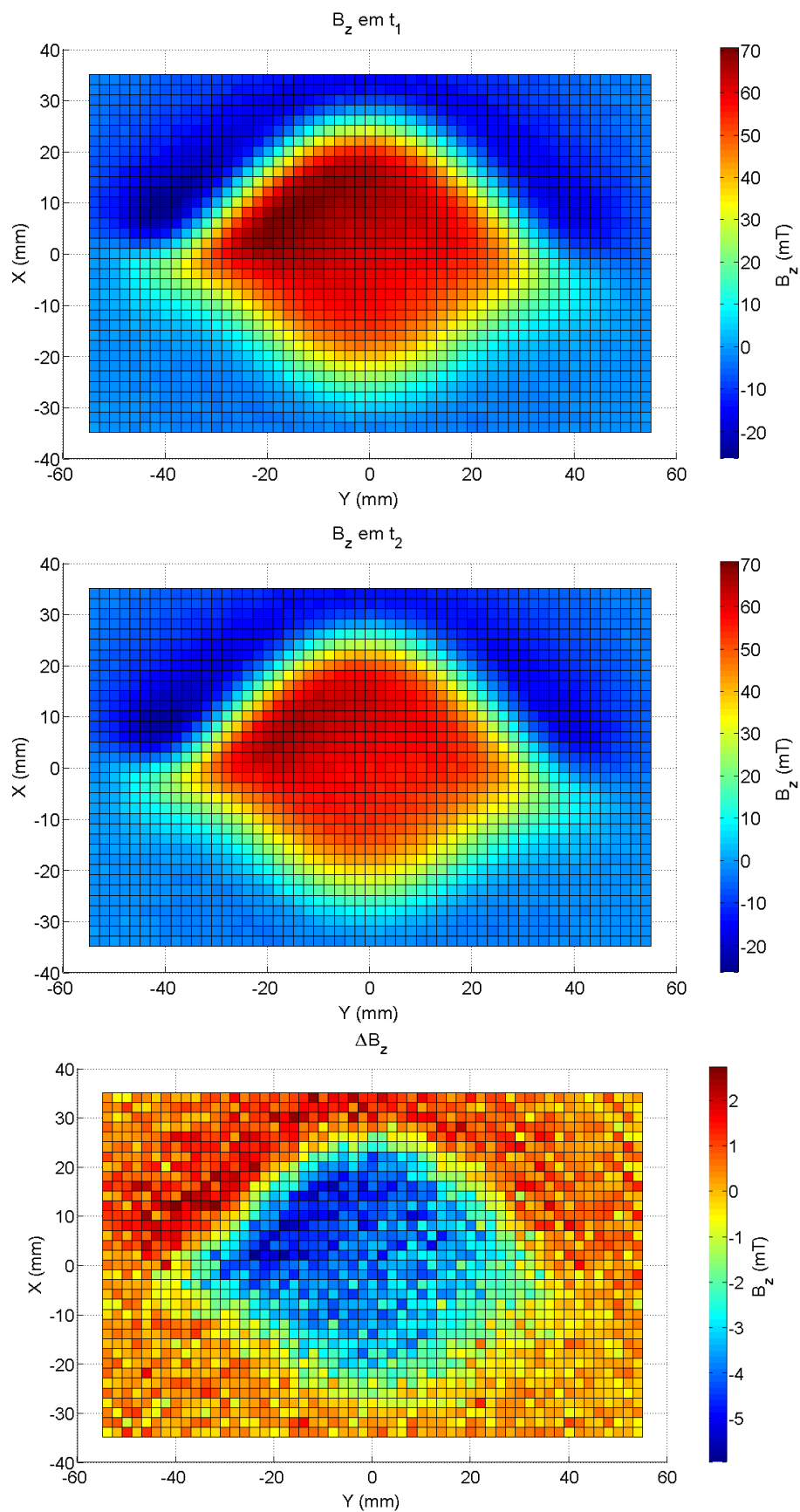


Figura 40 - Mapeamento em $t_1 = 15$ minutos da componente vertical do campo magnético produzido 3 mm acima do laço 2G pela corrente persistente nele induzida.

5.3.2. Simulações

A seguir, temos os campos resultantes das simulações com os dois modelos utilizados no programa *Maxwell*. Os modelos foram solucionados com o método dos elementos finitos com um critério de parada de erro máximo em energia e diferença máxima de energia entre iterações de 0,05% para o modelo de fita individual e de 0,01% para o modelo em bloco. As distribuições de campo mapeadas correspondem às componentes verticais a 3 mm de altura, como as que foram medidas experimentalmente, mas que são produzidas quando temos uma corrente de 50 A no modelo de fita individual e 5000 A (correspondentes a 50 A por fita) no modelo de laço 2G em bloco.

A Figura 41 mostra a contribuição de apenas uma fita ao campo resultante. Ou seja, é o resultado do modelo de fita individual, mostrada na Figura 37. O eixo maior da fita está disposto ao longo de $x \cong -5,1$ mm e a densidade máxima de campo magnético está abaixo de 1,6 mT.

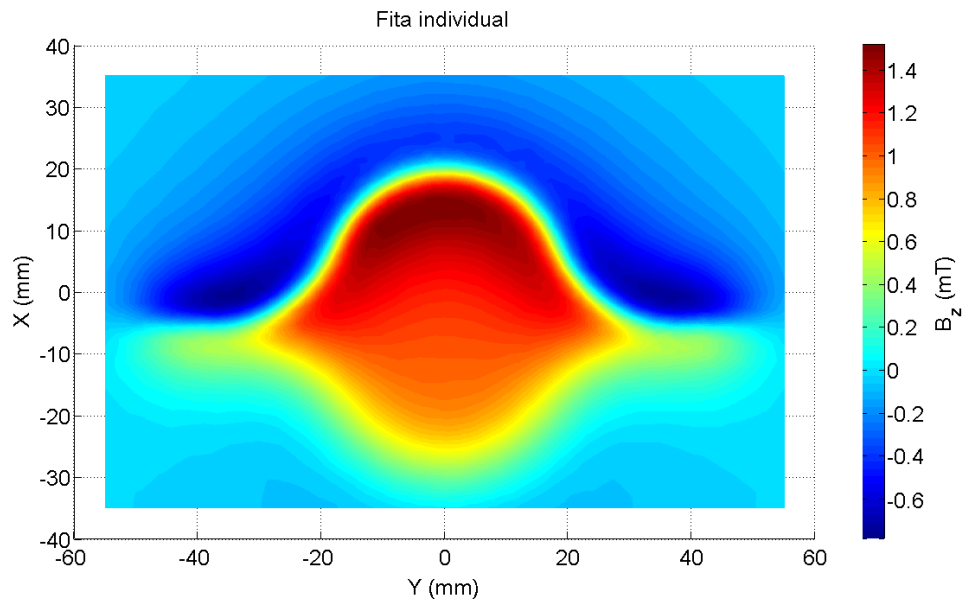


Figura 41 - Campo simulado produzido pela fita de uma das extremidades da bobina, centrada em $x \cong -5$ mm.

Deslocando a distribuição de campo da Figura 41 na direção de x positivo em passos de 0,10075 mm e somando cada uma dessas distribuições, temos uma emulação do campo do laço 2G com 100 fitas, mostrado na Figura 42, através da superposição dos campos individuais de 100 fitas. Essa é a distribuição de campo do laço 2G centrado em $(x, y) = (0, 0)$ e de cerca de 140 mT de densidade máxima de campo.

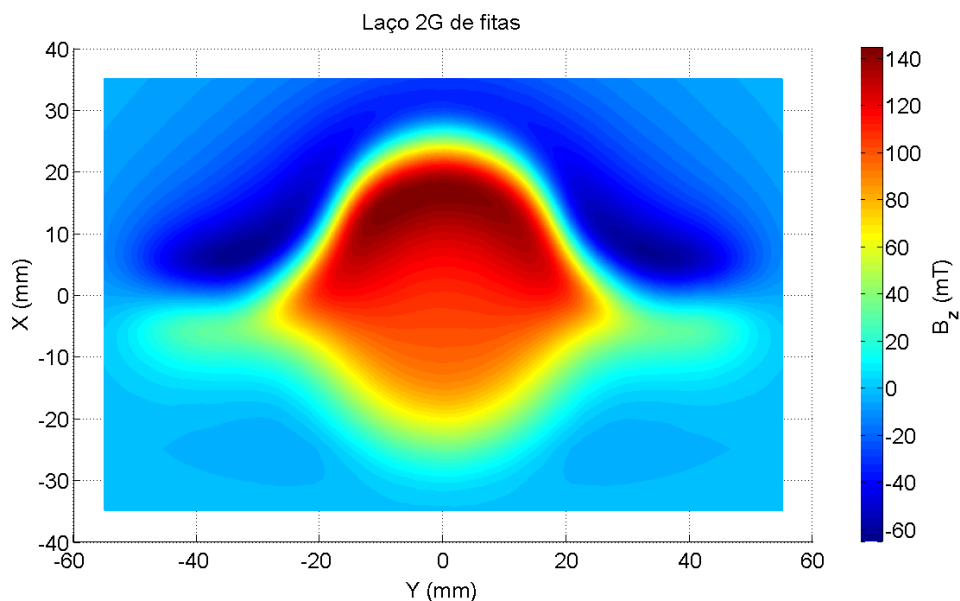


Figura 42 - Campo resultante da superposição dos 100 campos deslocados da fita individual.

Para possibilitar a comparação com as outras distribuições de campo, a distribuição da Figura 42 foi interpolada sobre uma grade de 2 mm de resolução. O resultado encontra-se na Figura 43.

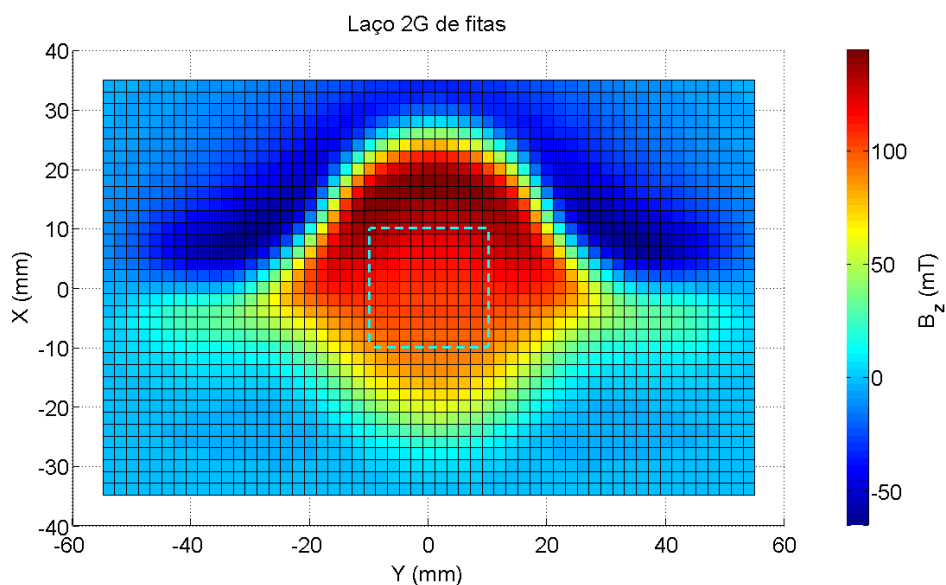


Figura 43 - Interpolação do campo resultante das 100 fitas e sub-região central indicada.

O campo resultante da simulação com o modelo de laço 2G em bloco se encontra na Figura 44. Pode-se claramente notar o efeito da diferente geometria que possui o laço 2G em bloco, em comparação com o laço 2G de fitas. A topologia do campo é alterada, assim como, naturalmente, o valor máximo de densidade de campo, que é um pouco menor no laço 2G em bloco.

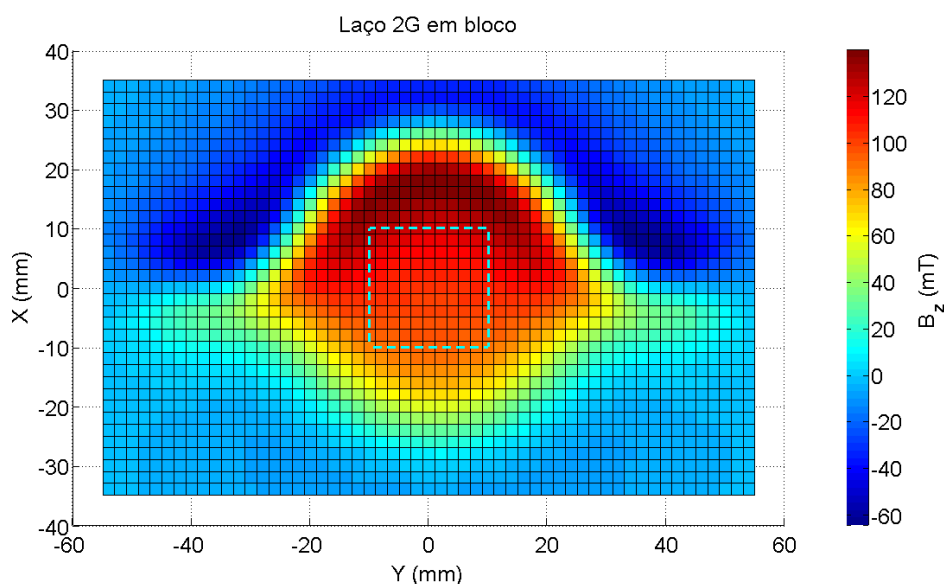


Figura 44 - Campo gerado pelo laço 2G modelado em bloco e sub-região central indicada.

Foi calculada a correlação cruzada entre cada par de distribuições de campo obtidas com o objetivo de caracterizar a similaridade de topologia entre essas distribuições, desconsiderando o efeito da intensidade de corrente utilizada. Os resultados dessa análise se encontram na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de correlação cruzada entre distribuições de campo.

	Sim. de fitas	Sim. em bloco	Ensaio
Sim. de fitas	1	0,9807	0,9145
Sim. em bloco	0,9807	1	0,9562
Ensaio	0,9145	0,9562	1

Pela Tabela 5, vemos que a distribuição de campo observada no ensaio apresenta uma correlação maior com a simulação do laço 2G em bloco do que com o laço 2G de fitas. Isso poderia ser esperado pelo fato de a geometria real do laço 2G ser melhor aproximada pelo modelo de laço 2G em bloco.

Para a comparação de uma sub-região da distribuição de campo para a determinação da corrente no laço 2G, foi escolhido o quadrado central mostrado na Figura 44 de 20 mm de lado, ou seja, $|x|, |y| \leq 10$ mm, o que compreende 100 pontos. A corrente foi calculada através da razão ponto a ponto média nessa sub-região, através da razão ponto a ponto média na região mapeada completa e através da razão entre os pontos de máxima densidade de campo magnético. Essa análise foi feita para ambas as simulações, laço 2G de fitas e em bloco, e os resultados encontram-se na Tabela 6 e na Tabela 7, respectivamente. Essas tabelas

indicam a razão calculada entre a corrente por fita durante o ensaio e a corrente por fita na simulação (50 A) para cada um dos métodos citados.

Tabela 6 - Correntes persistentes calculadas, para cada método, usando a simulação de laço 2G de fitas.

	Método utilizado		
	Máximos	Região completa	Sub-região
Razão	0,489	5,55	0,557
$I_{\text{laço 2G}} \text{ calculada (A)}$	24,4	277	27,8

Analisando a Tabela 6, fica logo claro o problema do método de região completa. Como evidenciado pela análise de correlação cruzada, o modelo de laço 2G de fitas leva a uma distribuição de campo ligeiramente diferente da observada nos ensaios. Isso leva a razões entre as densidades de campo em alguns pontos muito diferentes da razão entre as correntes de ensaio e de simulação, resultando em uma corrente calculada de ensaio de 277 A, que claramente destoa dos outros métodos e do outro modelo. Esse valor será, portanto, desconsiderado nas análises seguintes.

Tabela 7 - Correntes persistentes calculadas, para cada método, usando a simulação de laço 2G em bloco.

	Método utilizado		
	Máximos	Região completa	Sub-região
Razão	0,504	0,481	0,575
$I_{\text{laço 2G}} \text{ calculada (A)}$	25,2	24,1	28,8

A região completa da Tabela 7 nos dá um valor mais próximo do encontrado nos outros métodos. Novamente, isso era esperado pela maior correlação entre o modelo em bloco e o ensaio.

Podemos observar que cada método retorna valores mais próximos entre si para ambos os modelos de laço 2G, com um desvio de 3,28% para o dos máximos e de 3,60% para o de sub-região. O desvio máximo entre os valores obtidos (descartando o de região completa para o modelo de laço 2G de fitas), por outro lado, foi de 19,5%.

Com esses valores calculados, temos uma corrente média de 26,1 A. O valor real da corrente deve estar, entretanto, mais próximo ao valor encontrado pelo método de média em uma sub-região no modelo do laço 2G em bloco. Isso se deve ao fato da distribuição de campo do laço 2G em bloco representar melhor a

distribuição real e à maior robustez do método de média em sub-região. Não está provado neste trabalho, mas espera-se intuitivamente uma maior robustez deste método por ser um valor médio das razões de densidades de campo, em oposição à razão das densidades em um único ponto, que é mais sujeita a ruídos e incertezas. Sabe-se também que a região de pico de densidade de campo é mais sensível a variações na altura de mapeamento que a região central, sendo suas medidas mais afetadas pelas incertezas de posicionamento do sensor no eixo z.

6. Conclusões e trabalhos futuros

No presente trabalho, construiu-se um mancal magnético feito com fitas supercondutoras 2G em uma configuração nova, mediram-se as forças sobre esse mancal sob diversas condições de resfriamento quando movimentado nas proximidades do mesmo trilho utilizado no trem MagLev Cobra e observou-se e estimou-se a corrente persistente circulante no laço 2G e seu decaimento após indução por variação de fluxo magnético enlaçado na bobina supercondutora. Há uma extensa quantidade de dados de forças devidas à movimentação do laço 2G próximo ao trilho, alguns dos quais foram apresentados na seção 4.3. Modelos simples do laço 2G foram desenvolvidos no *software Maxwell* e utilizados para a estimação da corrente persistente no laço 2G.

As medidas de força de levitação apresentadas para os ensaios com ímã cilíndrico foram ligeiramente maiores que para fitas empilhadas que imitam um *bulk*, apesar de utilizar apenas um terço do material. As forças de levitação nos ensaios com o trilho alcançaram quase 80 N, valor que poderia ter sido maior, caso não ocorresse a quebra na inclinação da curva, o que não ocorreu com o ímã cilíndrico. Uma provável explicação é que, pelo campo do ímã cilíndrico ser menos intenso que o campo do trilho, as densidades de corrente desenvolvidas pela variação de fluxo enlaçado nos ensaios com o ímã cilíndrico não foram tão altas de forma a atingir a densidade de corrente crítica.

Nas simulações dos ensaios força, foi observada uma considerável disparidade nas componentes horizontais da força medida e simulada, quando igualou-se a componente vertical. Esse resultado era esperado e indica que o problema abordado é mais complexo, provavelmente envolvendo uma distribuição de corrente que deve ser estudada com maior cuidado. Os resultados encontrados não podem ser explicados por um modelo tão simplista.

As estimativas feitas sobre a corrente persistente no laço 2G durante os ensaios de mapeamento de campo mostraram desvios de até 19,5% entre si. Considerando a provável robustez dos métodos utilizados e a correlação maior entre a distribuição real de campo e a do modelo de laço 2G em bloco, entretanto, é mais provável que a corrente observada esteja em torno de 28,8 A. Esse valor corresponde ao valor médio de corrente em cada fita, o que resultaria na corrente total no laço 2G de 2880 A. A corrente média por espira está bem abaixo da corrente crítica, de ~150 A de acordo com os valores fornecidos pelo fabricante (cerca de 300

A, deve ser tomada a metade desse valor, pois a seção da fita foi dividida), mas deve-se levar em conta que a intensidade do campo magnético reduz este valor. Adicionalmente, como foi considerado apenas o valor médio da corrente por fita, é provável que valores mais altos de corrente tenham sido atingidos em determinadas fitas.

Futuramente, podem ser realizados trabalhos de otimização desse modelo de mancal magnético. A otimização pode ser feita nas dimensões do laço 2G, número de fitas que o compõem e detalhes de sua geometria. Também é necessário que se façam estudos sobre o aprimoramento do processo de produção do laço 2G. Seria muito interessante o desenvolvimento de modelos acerca da distribuição de corrente que ocorre em um laço 2G, o que permitiria uma melhor compreensão dos resultados apresentados neste trabalho.

Já foi vislumbrado o possível uso do laço 2G em conjunto com blocos supercondutores (*bulk*) ou com fitas empilhadas. Portanto, há potencial para trabalhos futuros sobre como combinar essas configurações para obter um mancal com melhor desempenho, aproveitando características particulares de cada configuração.

7. Referências bibliográficas

- ABRIKOSOV, A. A., 1957, "On the magnetic properties of the second group". *Soviet Physics*, v. 5, n. 6, pp. 1174-1182.
- ANSOFT, 2009, *Ansoft Maxwell Field Simulator v12 User's Guide*, rev. 2.0, Pittsburg.
- BARDEEN, J., COOPER, L. N., SCHRIEFFER, J. R., 1957, "Theory of superconductivity". *Physics Review*, v. 2, n. 108, pp. 1175-1204.
- BALDAN, C. A., LAMAS, J. S., SHIGUE, C. Y., *et al.*, 2009, "Fault Current Limiter Using YBCO Coated Conductor - The Limiting Factor and Its Recovery Time". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp.1810-1813.
- BEAN, C. P., 1962, "Magnetization of hard superconductors". *Physical Review Letters*, v. 8, pp. 250-253, MarMar.
- COOPER, L. N., 1956, "Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas". *Phys. Rev.*, 104, 1189.
- DIAS, D. H. N., 2009, *Modelagem de Mancais Lineares Supercondutores Considerando o Resfriamento na Presença de Campo Magnético*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DIAS, D. N. H., SOTELO, G. G., ANDRADE JR., R., *et al.*, 2008, "The Flux Creep Effect in Superconducting Magnetic Bearings Levitation Force". *Journal of Physics*, v. 97, n. 012216.
- FAGNARD, J. F., DIRICKX, M., LEVIN, G. A., *et al.*, 2010, "Use of second generation coated conductors for efficient shielding of dc magnetic fields". *Journal of Applied Physics*, v. 108, n. 013910.
- FERNANDES, R. P., 2011, *Desenvolvimento de um Sistema de Mapeamento de Densidade de Fluxo Magnético*. Projeto de Graduação, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- GINZBURG, V. L., LANDAU, L. D., 1950, "On the theory of superconductivity". *Zh. Eksperim. i Teor. Fiz.*, v. 20, n. 1064.
- HAZELTON, D. W., SELVAMANICKAM, V., 2009, "SuperPower's YBCO Coated High-Temperature Superconducting (HTS) Wire and Magnet Applications". *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 11, pp.1831-1836.
- LEVIN, G. A., BARNES, P. N., MURPHY, J., *et al.*, 2008, "Persistent current in coils made out of high temperature second generation superconductor wire". *Applied Physics Letters*, v. 93, n. 062504.

LONDON, F., LONDON, H., 1934, "The Electromagnetic Equations of the Supraconductor". *Proceedings of the Royal Society of London*, A 149, 71.

MEISSNER, W., OCHSENFELD, R., (1933), "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit". *Naturwissenschaften*, 21, pp. 787-788.

MOTTA, E. S., 2011, *Otimização de Trilho Magnético de um Sistema de Levitação Supercondutora para Veículo Maglev*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NICOLSKY, R., *et al.*, 2000, "The Brazilian project for a superconducting magnetic levitation train". In: *Proc. XVI Int. Conf. Magn. Levitated Syst. Linear Drives*, Rio de Janeiro, v. 1, pp. 179–182.

NUMERICAL RECIPES SOFTWARE, 2008, *Numerical Recipes in C*. 2 ed, Book ver. 2.10. Disponível em: <http://apps.nrbook.com/c/index.html>. Acessado em: 8 ago. 2013, 15:15.

OGATA, M., MIYAZAKI, Y., HASEGAWA, H., *et al.*, 2010, "Basic Study of HTS Magnet Using 2G Wires for Maglev Train". *Physica C*, v. 470, pp.1782-1786.

ONNES, H. K., 1911, "The Superconductivity of Mercury". *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, 120 b, 124.

PEI, R., *et al.*, 2009, "Numerical and Experimental Analysis of IC and AC Loss for Bent 2G HTS Wires Used in an Electric Machine". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp.3356-3360.

ROCHA, P. F. F., SOUZA, P. V. L., FELIX, L. B., 2012, "Sistema de aquisição de sinais eletrofisiológicos com controle de amplificadores e filtros via software". In: *Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 2872-2876, Campina Grande, SetSep.

ROSE-INNES, A. C., RHODERICK, E. H., 1969, *Introduction to Superconductivity*. 1 ed. Glasgow, Pergamon Press.

SASS, F., 2011, *Mancais Magnéticos Supercondutores Utilizando Fitas de Segunda Geração*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SASS, F., ANDRADE JR., R., *et al.*, 2012b, "Superconducting Levitation Using Coated Conductors", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 12-A-1397.

SASS, F., ANDRADE JR., R., DIAS, D. H. N., *et al.*, 2012a, "Coated conductors for the magnetic bearing application". *Physics Procedia*, v. 36, pp. 1008-1013.

SASS, F., SOTELO, G. G., ANDRADE JR., R., 2012, "Desenvolvimento de um sensor de corrente de baixo custo para operar imerso em nitrogênio líquido". In: *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática*, Campina Grande, SetSep.

SELVAMANICKAM, V., *et al.*, 2009, "High Performance 2G Wires: From R&D to Pilot-Scale Manufacturing". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp. 3225-3230.

SOTELO, G. G., 2007, *Modelagem de Supercondutores Aplicada ao Projeto de Mancais Magnéticos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SOTELO, G. G., ANDRADE JR., R., DIAS, D. N. H., *et al.*, 2013, "Tests with one Module of the Brazilian Maglev-Cobra Vehicle". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 23, n. 3, 3601204, junho.

SOTELO, G. G., KASAL, R. B., FERREIRA, A. C., *et al.*, 2004, "Utilização das Equações de London para a Modelagem de Supercondutores". In: *Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, São Paulo. MOMAG 04, 2004, v. 1, pp. 1-5.

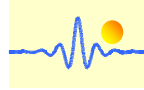
SOUSA, W. T. B., 2011, *Simulações e Ensaios com Limitadores de Corrente de Curto-Circuito Supercondutores do Tipo Resistivo*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

STEPHAN, R. M., ANDRADE JR., R., FERREIRA, A. C., 2012, "Superconducting Light Rail Vehicle". *IEEE Vehicular Technology Magazine: A Transportation Solution for Highly Populated Cities*, v. 7, pp. 122-127, dezembro.

WEISSTEIN, E. W., "Correlation Coefficient" *From MathWorld -- A Wolfram Web Resource*. Disponível em: <http://mathworld.wolfram.com/CorrelationCoefficient.html>. Acesso em: 8 ago. 2013, 15:05.

8. Anexo

8.1. Sensor de efeito *Hall*



ChenYang
Technologies GmbH & Co. KG

CYSJ106C GaAs HALL-EFFECT ELEMENTS

CYSJ106C series Hall-effect element is a ion-implanted magnetic field sensor made of mono-crystal gallium arsenide (GaAs) semiconductor material group III-V using ion-implanted technology. It can convert a magnetic flux density signal linearly into voltage output.

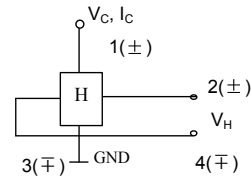
FEATURES

- High Linearity
- Superior Temperature Stability
- Miniature Package
- Wide measuring range 0-3T

TYPICAL APPLICATION

- Magnetic Field Measurement
- DC Brushless Motor
- Current Sensor
- Non-contact Switch
- Position Control
- Detection Of Revolution

BLOCK DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATING

Parameter	Symbol	Value	Unit
Max. Input Current/Voltage	I_C/V_C	13mA / 10V	mA/V
Max. Input Power	P_D	150	mW
Operating temperature range	T_A	-40~125	°C
Storage temperature range	T_S	-55~150	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A=25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Test conditions	Value	Unit
Hall output voltage	V_H	$B=100\text{mT}$, $I_C=8\text{mA}$, $V_C=6\text{V}$	110~150	mV
Offset voltage	$V_{OS}(V_U)$	$V_C=6\text{V}$, $B=0\text{mT}$	± 11	mV
Input resistance	R_{in}	$B=0\text{mT}$, $I_C=0.1\text{mA}$	650~850	Ω
Output resistance	R_{out}	$B=0\text{mT}$, $I_C=0.1\text{mA}$	650~850	Ω
Temperature coefficient of Hall output voltage	αV_H	$I_C=5\text{mA}$, $B=100\text{mT}$	-0.06	%/°C
Temperature coefficient of input and output resistance	αR_{in} αR_{out}	$I_C=0.1\text{mA}$, $B=0\text{mT}$ ($T_A=25^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$)	0.3	%/°C
Linearity	ΔK_H	$I_C=5\text{mA}$, $B=0.1/0.5\text{T}$	2	%

Notes:

$$\alpha V_H = \frac{1}{V_H(T_1)} \times \frac{V_H(T_2) - V_H(T_1)}{T_2 - T_1} \times 100,$$

$$\Delta K_H = \frac{K(B_1) - K(B_2)}{[K(B_1) + K(B_2)]} \times 200$$

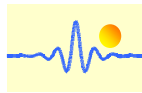
$$T_1=25^\circ\text{C}, T_2=125^\circ\text{C}, B_1=0.5\text{T}, B_2=0.1\text{T}$$

$$\alpha R_{in} = \frac{1}{R_{in}(T_1)} \times \frac{R_{in}(T_2) - R_{in}(T_1)}{T_2 - T_1} \times 100$$

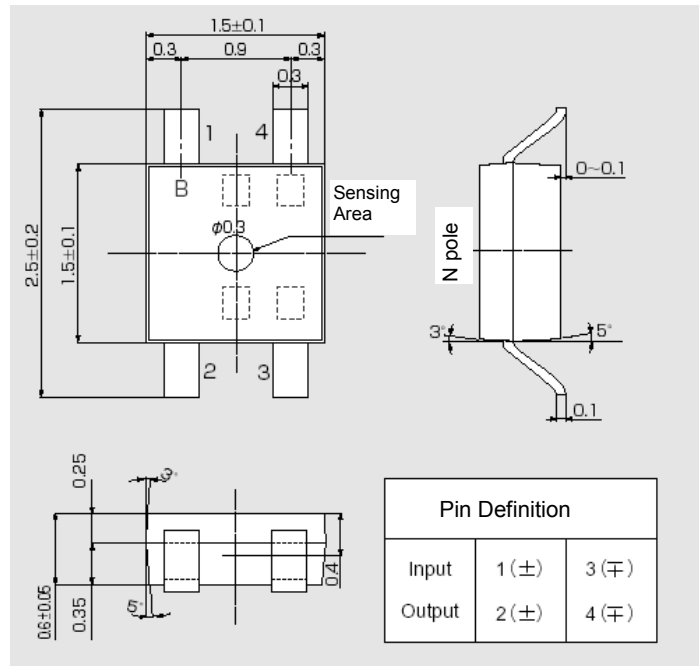
$$K_H = \frac{V_H}{I_C B}$$

Markt Schwabener Str. 8
D-85464 Finsing
Germany

Tel.: +49 (0)8121 – 2574100
Fax: +49 (0)8121 – 2574101
Email: info@cy-sensors.com
<http://www.cy-sensors.com>

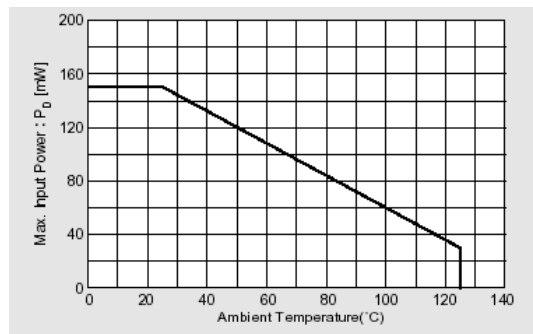


Package Outline Drawing (Unit: mm)



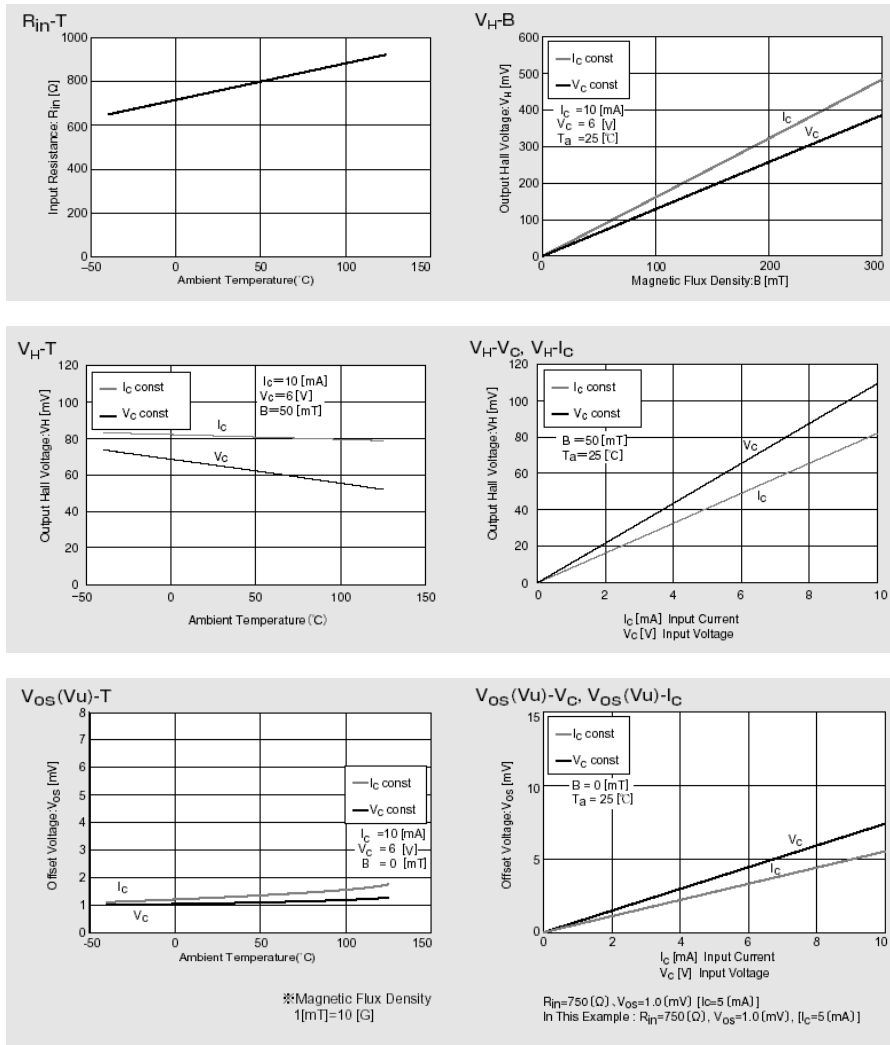
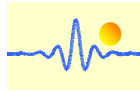
Characteristic Curves

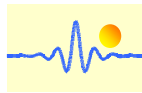
Allowable Package Power Dissipation



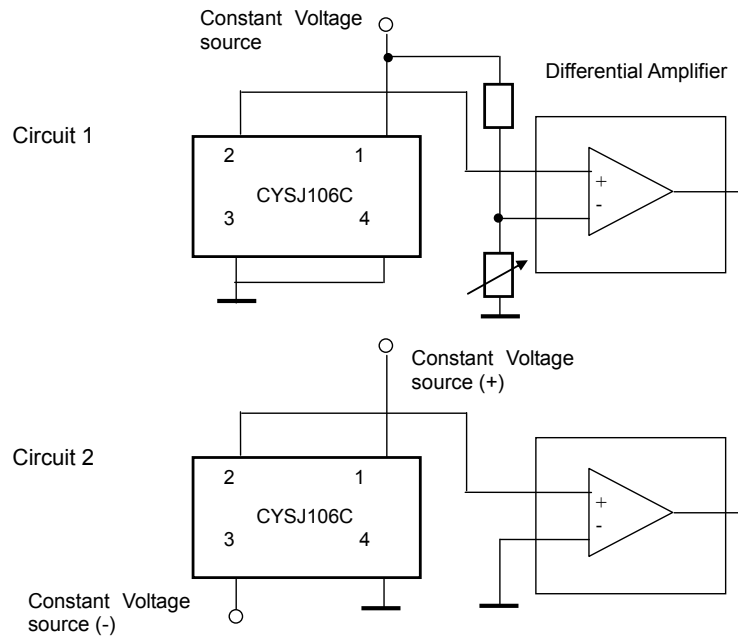
Markt Schwabener Str. 8
D-85464 Finsing
Germany

Tel.: +49 (0)8121 – 2574100
Fax: +49 (0)8121– 2574101
Email: info@cy-sensors.com
<http://www.cy-sensors.com>





Connection



Application Notes

The Hall voltage V_H can be positive and negative. But if one connects the sensor as follows (circuit 1):

Pin 1: positive input voltage V_+ , for instance +5VDC.
Pin 3: GND
Pin 2: OUTPUT
Pin 4: GND

One can only measure the positive voltage at the pin 2. This means that the output voltage at zero magnetic field is not zero. This voltage is called as offset voltage. The output voltage in this case is not equal to the Hall voltage. The output voltage is equal to the sum of offset voltage and Hall voltage.

The offset voltage will be zero if you connect double power supplies V_+ and V_- to the sensor (circuit 2):

Pin 1: positive input voltage V_+ , for instance +5VDC.
Pin 3: negative input voltage V_- , for instance -5VDC
Pin 2: OUTPUT
Pin 4: GND

In this case the output voltage is equal to the Hall Voltage.

Markt Schwabener Str. 8
D-85464 Finsing
Germany

Tel.: +49 (0)8121 – 2574100
Fax: +49 (0)8121– 2574101
Email: info@cy-sensors.com
<http://www.cy-sensors.com>

8.2. Fita 2G



SuperPower® 2G HTS Wire Specifications

Second-Generation High Temperature Superconductor (2G HTS)

SuperPower has been developing (RE)BCO-based 2G HTS wire at its manufacturing plant in Schenectady, NY since 2000 and is now routinely producing long lengths of high performance wire that is being shipped to customers around the world for a wide range of applications.

SuperPower® 2G HTS Wire is produced in an automated, continuous process beginning with an inexpensive high strength metal alloy "tape" as the base substrate material and adding buffer layers, ceramic-based superconductor material and protective overlayers.

Once the wire has been slit into device-specific widths, Surround Copper Stabilizer (SCS) is applied to completely encase the wire. Overcurrent capability in SCS wire can be tailored to the specific application. The stabilizer protects the conductor and produces rounded edges that are beneficial for high-voltage applications. Further, the probability of failure in the device due to voltage breakdown is reduced in wire with SCS. SuperPower's SCS has been successfully implemented and tested on continuous lengths of hundreds of meters of wire.

SuperPower® is a registered trademark of SuperPower Inc.

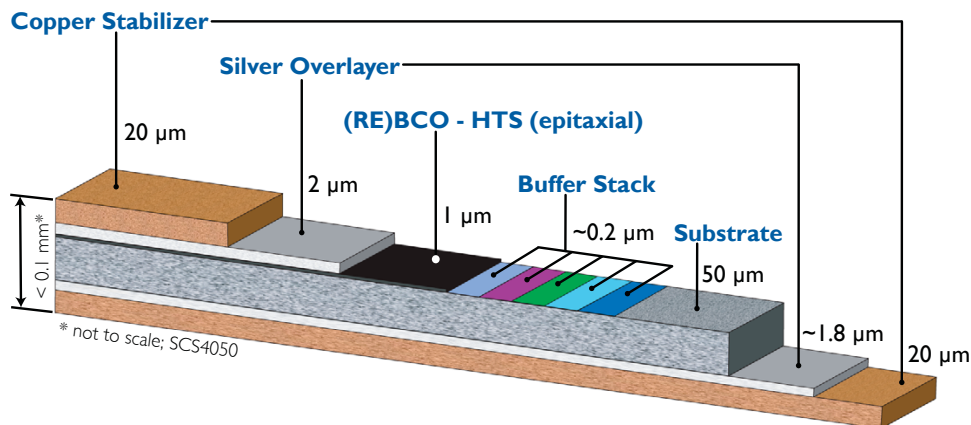
SuperPower Inc.
A Furukawa Company
superior performance. powerful technology.

SuperPower® 2G HTS Wire Specifications

Spec SF = Stabilizer Free SCS = Surround Copper Stabilizer	SCS3050	SF4050	SCS4050	SF6050	SCS6050	SF12050
Minimum I_c	75	100	100	150	150	300
Widths	3	4	4	6	6	12
Total Wire Thickness	0.1	0.055	0.1	0.055	0.1	0.055
Standard Copper Stabilizer Thickness	0.04	n/a	0.04	n/a	0.04	n/a
Critical Tensile Stress	> 550		> 550		> 550	
Critical Axial Tensile Strain	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%
Critical Bend Diameter in Tension	11	11	11	11	11	11
Critical Bend Diameter in Compression	11	11	11	11	11	11

Wire formulations

- **Cable Formulation (CF)** wire, utilizes standard wire chemistries that exhibit best performance at around 77K, the liquid nitrogen temperature regime, and in very low magnetic fields for cable and other similar applications.
- **Advanced Pinning (AP)** wire exhibits superior performance at a range of temperatures from 77K to as low as 4K and well suited for in-magnetic-field applications such as motors, generators and other high-field magnetics.
- **Fault Current Limiter (FCL)** wire utilizes the CF chemistry and begins with a thicker (100 micron), highly resistive Hastelloy® substrate suitable for these grid protection devices. This application, which does not call for any copper stabilizer, can also benefit from the option to vary the thickness of the silver cap layer.



Substrate Thickness:
50 µm Hastelloy® C-276 [or 100 µm for SF12100]
Substrate Yield Strength:
1200 MPa at 77 K

Substrate Resistivity:
125 µΩ-cm – higher resistivity leads to lower eddy current ac loss
Magnetic Properties:
non-magnetic, leads to lower ferromagnetic ac loss

SCS12050	SF12100	Unit	Comment
300	300	amp	measured by continuous direct current
12	12	mm	
0.1	0.105	mm	
0.04	n/a	mm	surround stabilizer with rounded corners
> 550		MPa	at 77K
0.45%	0.4%		at 77K
11	25	mm	at room temperature
11	25	mm	at room temperature

We are ready TODAY to discuss your SuperPower® 2G HTS Wire needs for your specific application.

- Standardized testing provided with all wire deliveries
- Hermeticity - 24 hrs, 10 bar, LN₂, no change in I_c & thickness
- I_c uniformity in long lengths of 2G HTS wire: STDEV < 10%
- Insulated wire is available (see back page for details)
- I_c values range from 80 up to 150 A at 77 K, 0 T in 4 mm widths
- Engineering Current Density at 77 K, 0 T
 - Standard Wire (J_e) = 250 A/mm²
 - Premium Wire (J_e) = 275 to 325 A/mm²

Other custom configurations are available.

Please visit us at <http://www.superpower-inc.com>, or by email at sales@superpower-inc.com, with your specifications, including:

- Wire length, width and thickness requirements
- Performance characteristics (critical current, stress, etc.)
- Silver overlayer and/or copper stabilizer preference
- Other physical or performance characteristics
- Delivery timeframe
- Application

SuperPower^d™ for superior performance.

SuperPower® 2G HTS Wire and coil application:



- **2011:** A new world-record magnetic field of 35.4 T inside a superconducting coil has been reached using a single piece of about 100 m of REBCO conductor wound in layers and nested in a 31 Tesla background magnet.

- **2009:** A high field magnet coil fabricated by SuperPower with its 2G HTS wire and tested at NHMFL again breaks world records when achieving a magnetic field of 27.4 Tesla at 4.2K in 19.89 Tesla background field



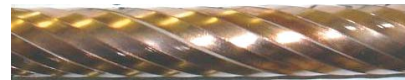
- **2008:** Coil fabricated by NHMFL with SuperPower® 2G HTS Wire was tested at 4.2K in 31 Tesla background field at NHMFL and achieved a world record of 33.8 Tesla at an average winding current density of 459 A/mm²

- **2007:** High field magnet coil fabricated with 2G HTS wire and tested at NHMFL achieved a record magnetic field of 26.8 Tesla in 19 Tesla background field at 4.2K



SuperPower has produced a number of prototype devices utilizing 2G HTS SCS Wire, including:

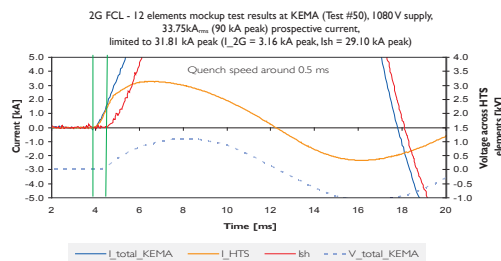
- The world's first in-grid HTS Power Cables were fabricated by Sumitomo Electric Industries with SuperPower's 4 mm wide 2G HTS wire

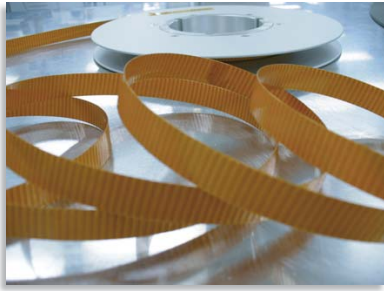


- Measured AC losses in a sample cable were 0.36 W/m at 1000A_{rms} (I_{op/peak}/I_c ~ 65%, 60 Hz) over the entire cable structure

Other applications:

- 2G HTS wire type SF12100 with highly resistive substrate is suitable for fault current limiter (FCL) applications. First peak limitation demonstrated with fast response time, low quench current, and rapid recovery.



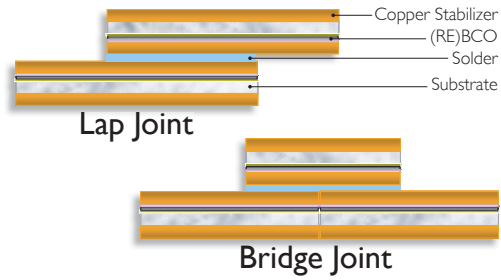
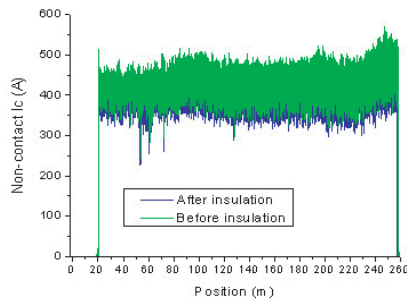


Insulated 2G HTS Wire

SuperPower offers in-house insulation for a variety of applications. Available configurations include 4 mm and 12 mm wire widths.

Wire is insulated with 0.025 mm or 0.050 mm thick polyimide, both with a ~ 0.050 mm silicone adhesive. Wrapping styles are butt wrapped (no overlap) or an adjustable overlap of 0 to 50%.

After insulation, the wire is not accessible for transport current measurements at every 5 m in the reel-to-reel test system. Therefore, a non-contact I_c technique is used to re-confirm the wire quality after insulation.



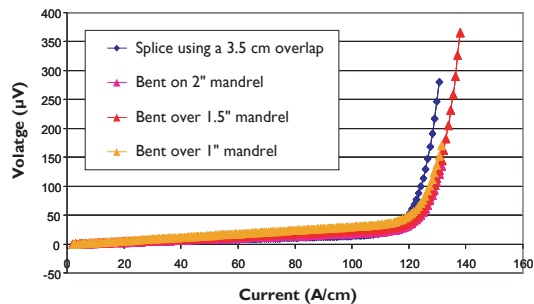
High Quality Joints

SuperPower Inc. routinely holds the world record in long, splice-free lengths of 2G HTS wire. Despite these long lengths, however, it is often necessary to splice wire segments together. Our low resistance, high quality joints and splices have a minimal effect on the superior performance of our wire.

- Base tape thickness = 0.1 mm
- Thickness at joint or splice = 0.22 mm (*about two times thinner than splices with 1G or other 2G wires!*)
- Joint length = 2.5 to 10 cm, or per customer specifications
- Temperature limit on solder up to 250°C (much higher than with other 2G HTS wires)

Joints between 2G HTS wires show excellent electrical and thermo-mechanical properties.

- No degradation in I_c ($1 \mu V/cm$) over the joint or splice
- No decrease in I_c and no increase in joint resistivity when bent over a diameter of 1 inch
- Minimum bend diameter at joint = 25 mm
- Typical joint resistance less than 20 nΩ, 100 mm over lap





SuperPower Inc. is a subsidiary of Furukawa Electric Co., Ltd.

2G Marketing/Marketing Collateral/Working Sheets/PDF Sheets/2013/2P_3G Wire Spec Sheet_for web_2013REC_v2.pdf

SuperPower Inc. ■ 450 Duane Ave. ■ Schenectady, NY 12304 USA
Tel: 518-346-1414 ■ Fax: 518-346-6080
E-mail: info@superpower-inc.com ■ Website: www.superpower-inc.com

8.3. Amplificador Operacional *INA122*



INA122

Single Supply, *MicroPower*
INSTRUMENTATION AMPLIFIER

FEATURES

- LOW QUIESCENT CURRENT: 60 μ A
- WIDE POWER SUPPLY RANGE
Single Supply: 2.2V to 36V
Dual Supply: -0.9/+1.3V to \pm 18V
- COMMON-MODE RANGE TO (V-)-0.1V
- RAIL-TO-RAIL OUTPUT SWING
- LOW OFFSET VOLTAGE: 250 μ V max
- LOW OFFSET DRIFT: 3 μ V/ $^{\circ}$ C max
- LOW NOISE: 60nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 25nA max
- 8-PIN DIP AND SO-8 SURFACE-MOUNT

APPLICATIONS

- PORTABLE, BATTERY OPERATED SYSTEMS
- INDUSTRIAL SENSOR AMPLIFIER:
Bridge, RTD, Thermocouple
- PHYSIOLOGICAL AMPLIFIER:
ECG, EEG, EMG
- MULTI-CHANNEL DATA ACQUISITION

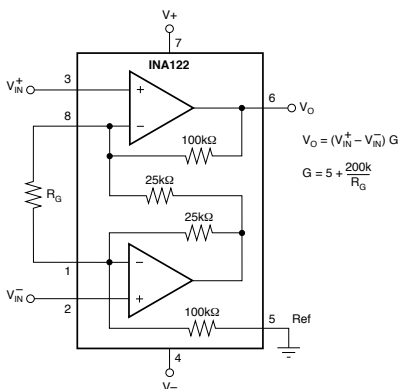
DESCRIPTION

The INA122 is a precision instrumentation amplifier for accurate, low noise differential signal acquisition. Its two-op-amp design provides excellent performance with very low quiescent current, and is ideal for portable instrumentation and data acquisition systems.

The INA122 can be operated with single power supplies from 2.2V to 36V and quiescent current is a mere 60 μ A. It can also be operated from dual supplies. By utilizing an input level-shift network, input common-mode range extends to 0.1V below negative rail (single supply ground).

A single external resistor sets gain from 5V/V to 10000V/V. Laser trimming provides very low offset voltage (250 μ V max), offset voltage drift (3 μ V/ $^{\circ}$ C max) and excellent common-mode rejection.

Package options include 8-pin plastic DIP and SO-8 surface-mount packages. Both are specified for the -40 $^{\circ}$ C to +85 $^{\circ}$ C extended industrial temperature range.


$$V_O = (V_{IN+} - V_{IN-}) G$$
$$G = 5 + \frac{200k}{R_G}$$

International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111 • Twx: 910-952-1111
Internet: <http://www.burr-brown.com/> • FAXLine: (800) 548-6133 (US/Canada Only) • Cable: BBRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 889-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132

SPECIFICATIONS

At $T_A = +25^{\circ}\text{C}$, $V_S = +5\text{V}$, $R_L = 20\text{k}\Omega$ connected to $V_S/2$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	INA122P, U			INA122PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT								
Offset Voltage, RTI	$V_S = +2.2\text{V}$ to $+36\text{V}$		± 100	± 250		± 150	± 500	μV
vs Temperature			± 1	± 3		*	± 5	$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
vs Power Supply (PSRR)			10	30		*	100	$\mu\text{V}/\text{V}$
Input Impedance			$10^{10} \parallel 3$			*		$\Omega \parallel \text{pF}$
Safe Input Voltage	$R_S = 0$	(V-) -0.3		(V+) +0.3	*		*	V
	$R_S = 10\text{k}\Omega$	(V-) -40		(V+) +40	*		*	V
Common-Mode Voltage Range		0		3.4	*		*	V
Common-Mode Rejection	$V_{CM} = 0\text{V}$ to 3.4V	83	96		76	90		dB
INPUT BIAS CURRENT								
vs Temperature			-10	-25		*	-50	nA
Offset Current			± 40			*		$\text{pA}/^{\circ}\text{C}$
vs Temperature			± 1	± 2		*	± 5	nA
			± 40			*		$\text{pA}/^{\circ}\text{C}$
GAIN			$G = 5$ to 10k			*		V/V
Gain Equation			$G = 5 + 200\text{k}\Omega/R_G$			*		V/V
Gain Error	$G = 5$		± 0.05	± 0.1		*	± 0.15	%
vs Temperature	$G = 5$		5	10		*	*	$\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$
Gain Error	$G = 100$		± 0.3	± 0.5		*	± 1	%
vs Temperature	$G = 100$		± 25	± 100		*	*	$\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$
Nonlinearity	$G = 100$, $V_O = -14.85\text{V}$ to $+14.9\text{V}$		± 0.005	± 0.012		*	± 0.024	%
NOISE (RTI)								
Voltage Noise, $f = 1\text{kHz}$			60			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 100\text{Hz}$			100			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 10\text{Hz}$			110			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz			2			*		$\mu\text{Vp-p}$
Current Noise, $f = 1\text{kHz}$			80			*		$\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz			2			*		pAp-p
OUTPUT								
Voltage, Positive	$V_S = \pm 15\text{V}$	(V+) -0.1	(V+) -0.05		*	*		V
Negative	$V_S = \pm 15\text{V}$	(V-) +0.15	(V-) +0.1		*	*		V
Short-Circuit Current	Short-Circuit to Ground		+3/-30			*		mA
Capacitive Load Drive			1			*		nF
FREQUENCY RESPONSE								
Bandwidth, -3dB	$G = 5$		120			*		kHz
	$G = 100$		5			*		kHz
	$G = 500$		0.9			*		kHz
Slew Rate			+0.08/-0.16			*		V/ μs
Settling Time, 0.01%	$G = 5$		350			*		μs
	$G = 100$		450			*		μs
	$G = 500$		1.8			*		ms
Overload Recovery	50% Input Overload		3			*		μs
POWER SUPPLY								
Voltage Range, Single Supply		+2.2	+5	+36	*	*	*	V
Dual Supplies		-0.9/+1.3		± 18	*	*	*	V
Current	$I_O = 0$		60	85		*	*	μA
TEMPERATURE RANGE								
Specification		-40		+85	*		*	$^{\circ}\text{C}$
Operation		-55		+85	*		*	$^{\circ}\text{C}$
Storage		-55		+125	*		*	$^{\circ}\text{C}$
Thermal Resistance, θ_{JA}								
8-Pin DIP			150			*		$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
SO-8 Surface-Mount			150			*		$^{\circ}\text{C}/\text{W}$

*: Specification same as INA122P, INA122U.

The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.



INA122